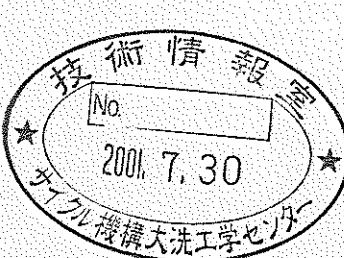
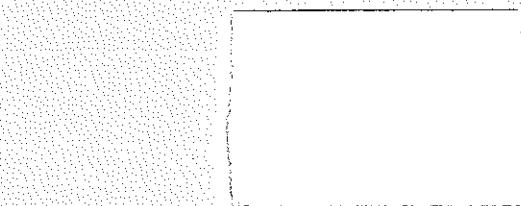


FBR 金属材料試験実施要領書（改訂版）

（マニュアル）



2001年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

F B R 金属材料試験実施要領書（改訂版）
(マニュアル)

加藤 章一*、鬼澤 高志*、吉田 英一*、
青砥 紀身*

要 旨

本要領書は、高速炉の高温構造設計技術開発の一環として実施している大気中及びナトリウム中材料試験の実施方法や得られたデータの整理方法についてとりまとめたものである。本要領書は、日本工業規格（J I S）における試験法の改訂及び国際単位（S I）系への変更を反映するとともに、日本鉄鋼協会のV A M A S（Versailles Project on Advanced Materials and Standards）低サイクル疲労研究部会などの国内委員会における材料試験手法の動きも視野に入れながら作成した。また、材料試験技術の伝承などを図るため、当グループで蓄積された試験技術についてもとりまとめた。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 機器・構造安全工学グループ

FBR Metallic Materials Test manual (revised Edition)

Shoichi KATO*, Takashi ONIZAWA*, Eiichi YOSHIDA*,
Kazumi AOTO*

Abstract

For the development of the fast breeder reactor, this manual described the method of in-air and in-sodium test for materials and the arrangement method of the data. This manual is reflected the revision of Japanese Industrial Standard (JIS) and change to the international unit. The test method of domestic committees such as the VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) workshop was also considered. And, the material test technologies accumulated in this group until now were arranged in order to transmit all of them.

* Advanced Technology Division, Structure Safety Engineering Group

目 次

1. はじめに	1
2. 材料試験の実施要領	2
2.1 引張試験	2
2.1.1 適用範囲	2
2.1.2 用語の定義	2
2.1.3 試験片	2
2.1.4 試験装置	3
2.1.5 試験方法	4
2.1.6 試験結果の報告	7
2.1.7 試験結果のデータベース化	7
2.1.8 引用規格	8
2.2 クリープ試験（含クリープ破断試験）	19
2.2.1 適用範囲	19
2.2.2 用語の定義	19
2.2.3 試験片	19
2.2.4 試験装置	20
2.2.5 試験方法	21
2.2.6 試験結果の報告	23
2.2.7 試験結果のデータベース化	23
2.2.8 引用規格	24
2.3 リラクセーション試験	31
2.3.1 適用範囲	31
2.3.2 用語の説明	31
2.3.3 試験片	31
2.3.4 試験装置	31
2.3.5 試験方法	33
2.3.6 試験結果の報告	34
2.3.7 試験結果のデータベース化	35
2.3.8 引用規格	35
2.4 低サイクル疲労試験	40
2.4.1 適用範囲	40
2.4.2 用語の説明	40

2.4.3 試験片	40
2.4.4 試験装置	41
2.4.5 試験方法	43
2.4.6 試験結果の報告	47
2.4.7 試験結果のデータベース化	47
2.4.8 引用規格	48
謝辞	61
参考文献	62

図表リスト

2.1 引張試験

表 2.1-1	引張試験に関する用語の定義	9
表 2.1-2	試験温度の目標範囲	11
図 2.1-1	引張試験片外観図	12
図 2.1-2	試験片平行部加工要領	13
図 2.1-3	特殊引張試験片の製作例	13
図 2.1-4	アームショルダー型伸び計の取り付け図	14
図 2.1-5	引張試験片寸法測定箇所	14
図 2.1-6	熱電対先端部の形状	16
図 2.1-7	放射熱による計測誤差の防止	16
図 2.1-8	破断後の寸法測定箇所	16
図 2.1-9	破断位置の明示方法	18

2.2 クリープ試験（含クリープ破断試験）

表 2.2-1	クリープ試験及びクリープ破断試験に関する用語の定義	25
表 2.2-2	試験温度の目標範囲	27
表 2.2-3	クリープデータ測定間隔	27
図 2.2-1	クリープ試験片外観図	28
図 2.2-2	アームショルダー型伸び計の取り付け図	29
図 2.2-3	段階負荷方法	29
図 2.2-4	クリープ曲線のひずみ補正処理	30

2.3 リラクセーション試験

表 2.3-1	リラクセーション試験に関する用語の説明	36
図 2.3-1	リラクセーション試験片外観図	37
図 2.3-2	アームショルダー型伸び計の取り付け図	37
図 2.3-3	二重風防による試験精度の向上例	38
図 2.3-4	リラクセーション挙動の比較	39

2.4 低サイクル疲労試験

表 2.4-1	低サイクル疲労試験に関する用語の説明	49
図 2.4-1	大気中疲労試験片外観図	51

図 2.4- 2 ナトリウム中疲労試験片外観図	52
図 2.4- 3 特殊疲労試験片の製作例	53
図 2.4- 4 ひずみ計押し当て部の滑り防止対策	54
図 2.4- 5 アームショルダー型ひずみ計の取り付け図	55
図 2.4- 6 二重風防による試験精度の向上例	55
図 2.4- 7 冷却水管理システム	56
図 2.4- 8 水フィルターユニット	56
図 2.4- 9 疲労試験片寸法測定箇所	56
図 2.4-10 軸芯精度計測方法	57
図 2.4-11 試験片曲げひずみ成分計測方法	58
図 2.4-12 ひずみ計取り付け方法	58
図 2.4-13 热電対先端部の形状	59
図 2.4-14 温度制御の方法	59
図 2.4-15 热電対縛り付け方法	59
図 2.4-16 ナトリウム中疲労試験温度測定制御方法	59
図 2.4-17 破損繰り返し数の求め方	60
図 2.4-18 破損位置の明示方法	60

Appendix

2.1 引張試験

Appendix2.1-1	溶接に関する用語の定義	.....	65
Appendix2.1-2	引張試験装置仕様一覧	.....	67
Appendix2.1-3	大気中引張試験装置の構成図	.....	68
Appendix2.1-4	引張試験片つかみ部の外観図	.....	69
Appendix2.1-5	引張系オンラインデータ収集システムの構成	.....	70
Appendix2.1-6	弧状試験片の断面積の求め方	.....	71
Appendix2.1-7	FBR金属材料試験データシート（引張）	.....	72
Appendix2.1-8	引張試験データ（グラフ）	.....	73
Appendix2.1-9	構造材料試験データ処理システム(SMAT)	.....	74

2.2 クリープ試験

Appendix2.2-1	クリープ試験装置仕様一覧	.....	77
Appendix2.2-2	大気中クリープ試験装置の構成図	.....	78
Appendix2.2-3	クリープ試験片つかみ部の外観図	.....	79
Appendix2.2-4	クリープ系オンラインデータ収集システム	.....	80
Appendix2.2-5	FBR金属材料試験データシート（クリープ）	.....	81
Appendix2.2-6	クリープ試験データ（グラフ）	.....	82
Appendix2.2-7	クリープ試験データ（グラフ）	.....	83

2.3 リラクセーション試験

Appendix2.3-1	リラクセーション試験装置仕様一覧	.....	87
Appendix2.3-2	リラクセーション試験装置の構成図	.....	88
Appendix2.3-3	リラクセーション試験片つかみ部の外観図	.....	89
Appendix2.3-4	リラクセーション系オンラインデータ収集システム	.....	90
Appendix2.3-5	FBR金属材料試験データシート（リラクセーション）	.....	91
Appendix2.3-6	リラクセーション試験（グラフ）	.....	92

2.4 低サイクル疲労試験

Appendix2.4- 1	疲労試験装置仕様一覧	.....	95
Appendix2.4- 2	電気油圧サーボ制御方式疲労試験装置の構成図	.....	96
Appendix2.4- 3	電気サーボモータ制御方式疲労試験装置の構成図	.....	97
Appendix2.4- 4	疲労試験片つかみ部の外観図（油圧サーボ式）	.....	98
Appendix2.4- 5	長時間クリープ疲労試験片つかみ部の外観図（電気サーボモータ式）	.....	99
Appendix2.4- 6	疲労試験用ひずみ計の外観図（油圧サーボ式）	.....	100
Appendix2.4- 7	疲労試験用ひずみ計の外観図（電気サーボモータ式）	.....	101

Appendix2.4- 8	ナトリウム中疲労試験用ひずみ計の外観図（油圧サーボ式）	102
Appendix2.4- 9	疲労系オンラインデータ収集システム	103
Appendix2.4-10	ワークコイルの製作及び調整方法	104
Appendix2.4-11	FBR金属材料試験データシート（疲労）	106
Appendix2.4-12	ヒステリシスループの代表例	107
Appendix2.4-13	低サイクル疲労試験データ（グラフ）	108
Appendix2.4-14	長時間クリープ疲労試験データ（グラフ）	109
Appendix2.4-15	ナトリウム中疲労試験におけるひずみ較正方法	110

1. はじめに

これまでに、当グループでは高速原型炉「もんじゅ」の構造材料であるSUS304及び $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼等に対して各種材料試験を実施し、得られた成果は「高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」^[1]の策定に反映された。その後は、次期大型炉の構造材料の候補材である316FR及び改良9Cr-1Mo鋼について、各種材料試験を実施し、高温構造設計技術開発に必要なデータを取得してきている。

「FBR金属材料試験実施要領書」^[2]は、高速炉開発のために実施される材料試験の実施方法や試験結果の整理方法の標準化に資するため、昭和52年に作成された。本要領書（改訂版）は、日本工業規格（JIS）における試験法の改訂及び国際単位（SI）系への変更を契機に、上記「FBR金属材料試験実施要領書」を改訂したものである。また、本要領書は日本鉄鋼協会のVAMAS（Versailles Project on Advanced Materials and Standards）低サイクル疲労研究部会^[3]などの国内委員会における材料試験手法の動きも視野に入れながら作成した。なお、材料試験技術の伝承などを図るために、当グループで蓄積された試験技術についてもとりまとめた。

2. 材料試験の実施要領

2.1 引張試験

2.1.1 適用範囲

本章の規定は F B R 金属材料の引張試験に適用するものである。

2.1.2 用語の定義

本試験において用いられる用語の定義を表 2.1-1 に示す。

また、溶接に関する用語（共通）の定義を Appendix 2.1-1 に示す。

なお、単位の表示は JIS に従い国際単位系（S I）を用いる。

2.1.3 試験片

本試験において使用する試験片は原則として、JIS G 0567 及び JIS Z 2201 に準じるものとする。

なお、標点距離(GL)はツバの内側間の長さとする。

試験材料は、高速炉用構造材料の均一な金属組織を有する板、鍛造品、管及び棒材等並びに、これらの溶接金属や継手材料等を対象とする。

(1) 試験片形状

試験片は、図 2.1-1 に示すように原則として円形断面とし、ツバ付き中実丸棒型を標準とする。

平行部直径は 10 φ を標準とするが、6 φ、8 φ または 12 φ のものも用いることができる。試験片平行部の長さは 5 D (D : 平行部直径) とし、これを標点距離とする。

また、円形断面の試験片を採取することができない場合は、板状試験片及び管（伝熱管）そのままの形状を八つはし状に加工した弧状型試験片を使用しても差し支えない。

なお、標準試験片以外の形状、寸法のものを使用する場合は、別途協議の上決定する。

(2) 採取位置

試験片軸方向と素材仕上げ方向（ロール方向、押し出し方向、主鍛造方向）が平行になるように試験片を採取する。また、研究目的（異方性の評価等）によっては直角方向、板厚方向に試験片を採取できるものとする。ただし、溶接金属や継手材料の場合はこの限りではない。また、試験片を採取した位置・方向並びに加工方法については、明確にそのデータを記録しなければならない。

(3) 加工方法

① 試験片の加工は、図 2.1-2 に示す手順を目標とする。平行部外径の公差は ±0.01mm 以下、かつ試験片は原則として同芯に製作されなければならない。

② 試験片平行部の最終表面仕上げは軸方向に磨くこととし、600 番以上のエメリー紙で仕上げ、円周方向に鋭角な傷（旋盤傷）がないようにする。また、表面残留応力を最小にするため十分な冷却を行い浅くゆっくり加工する。最大主応力方向の表面粗さは 1.6 μm 以下が望ましい。

③ 板状試験片及び弧状試験片については、ワイヤーカットあるいは機械加工により加工する。加工面の最終仕上げは、エメリ一紙（600番以上）を用いて磨き上げる。

(4) 特殊試験片の製作

図2.1-3に狭開先溶接部よりの溶接金属及び縫手引張試験片の製作例を示す。

2.1.4 試験装置

本試験に使用する試験装置は、JIS B 7721 及び JIS G 0567 に、伸び計は JIS B 7741 に適合するものでなければならない。

本装置は、試験装置本体、伸び測定装置、加熱装置、記録装置等から構成される。当Grに設置されている試験装置の仕様を Appendix2.1-2 に、構成図を Appendix2.1-3 に示す。

(1) 試験装置本体

試験装置は、JIS B 7721 の等級1級以上に準じるものとする。

試験片に荷重を与える負荷装置、負荷速度を一定に制御するクロスヘッド制御装置及び荷重を測定する荷重検出器（ロードセル）等により構成されるものとする。荷重測定精度は±1.0%以内、クロスヘッド速度精度は±0.1%以内とする。

(2) 試験片つかみ部（チャック）

つかみ部は試験片の軸芯を保証する形状であり、引張力以外の力が加わらない構造のものとする。

つかみ部は、丸棒型試験片はネジ式、板状及び弧状型試験片はピン式が望ましい。つかみ部の材質は、インコネル718等の耐熱合金とする。

Appendix2.1-4に試験片つかみ部の外観図を示す。

(3) 伸び測定装置

試験片の軸方向の伸びを測定できるもので、JIS B 7741 の等級1級以上とする。

試験片標点間の伸びはアームショルダー型伸び計（図2.1-4参照）等にて測定する。

(4) 加熱装置

加熱装置は電気ヒータ加熱炉方式が望ましい。温度検出用熱電対は、JIS C 1602 によるものとし、900°Cまでが直径0.5φのR熱電対（JIS階級クラス2）、900~1600°Cまでが直径0.5φのB熱電対（JIS階級クラス2）を標準とする。また、温度制御はPID調節式とする。

(5) 記録装置

応力、ひずみ及び温度の計測には、レコーダやオンラインデータ収集システムを用いる。

① レコーダ

X-T Yレコーダにより、荷重、標点間伸びを、温度レコーダにより温度の時間変化を記録する。

② オンラインデータ収集システム

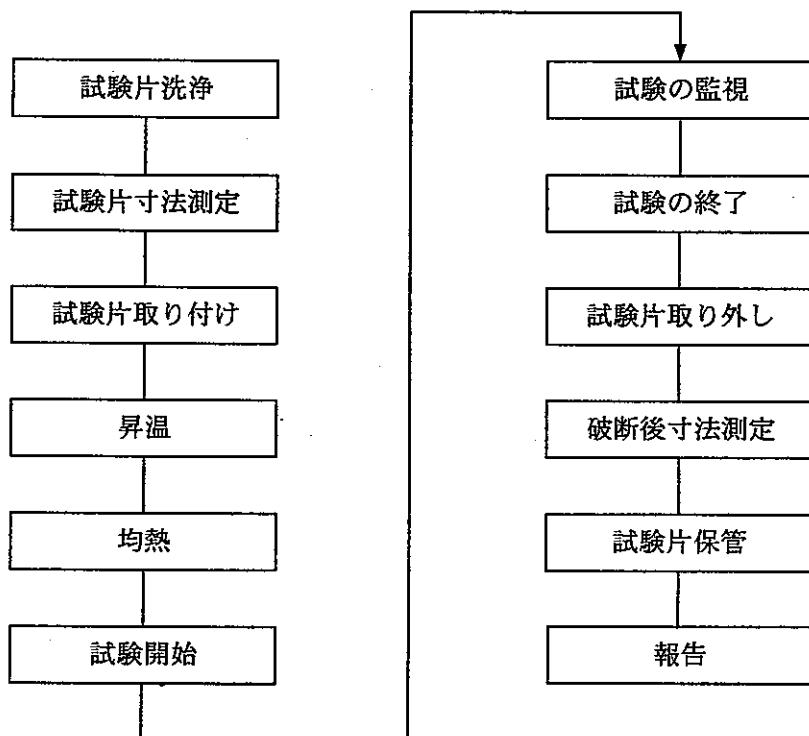
本システムにより引張試験データを計測し、計測したデータから各引張特性値を算出する。

Appendix 2.1-5 にオンラインデータ収集システムの構成を示す。

2.1.5 試験方法

試験温度、負荷方法、伸び、荷重の測定方法などについては JIS Z 2241 及び JIS G 0576 に従うものとする。

引張試験の標準的な試験手順を以下に示す。



(1) 試験片洗浄

試験片全体が洗浄液内に覆われる容量の洗浄容器を用い、超音波洗浄器を使用して、アセトン、エチルアルコールの順にそれぞれ10分間ドラフター内で試験片の洗浄を行う。

洗浄後の試験片は、錆等を防止するためデシケータに保管すること。

(2) 試験片寸法測定

① 丸棒試験片の計測

試験片標点間 (GL) 及びツバ間 (F) の測定は投影機等を使用して、図 2.1-5 に示すようにポンチマーク部を起点とし 180° 方向に2回測定する。また、直径の測定はマイクロメーターを使用して、A, B, C の3ヶ所を 90° 方向に2回測定する。なお、測定時には平行部に傷等を付けないように注意する。

応力算出に用いる断面積は、6ヶ所（A,B,C の3ヶ所×2回）の平均値から求める。

② 板状試験片の計測

試験片標点間（GL）及びツバ間（F）の測定は丸棒試験片と同様とする。図2.1-5に示すように、厚さ及び幅の測定はマイクロメーターを使用して、A,B,Cの3ヶ所を試験片中心部で測定する。
応力算出に用いる断面積は、A,B,Cの3ヶ所の平均値とする。

③ 弧状試験片の計測

試験片標点間（GL）及びツバ間（F）の測定は丸棒試験片と同様とする。図2.1-5に示すように、厚さ及び幅の測定は板状試験片と同様とする。ただし、厚さ測定において通常のマイクロメーターではすき間が生じるため、先端形状が球になっているものを使用する。

応力算出に用いる断面積は、A,B,Cの3ヶ所の平均値とする。なお、弧状試験片の断面積は、Appendix2.1-6に示す計算式により求める。

(3) 試験片取り付け

試験片の取り付けに際しては、ねじり及び曲げ等の負荷が試験片にかかるないようにする。

(4) 加熱方法

熱電対を試験片平行部の上、中、下3点に耐熱紐にて縛り付ける。試験片を電気炉等にて加熱し、熱電対3点の温度を表2.1-2の目標範囲内になるよう調整する。熱電対の先端（温度検出部）の形状は、図2.1-6に示すように球状にする。また、熱電対の先端を耐熱紐にて縛り付け覆うことによって、炉壁からの放射熱による計測誤差を防止する（図2.1-7参照）。

試験片の加熱に際しては、試験温度以上にならないように注意する。試験片は、試験温度に達してから試験開始まで約15分間均熱保持する。

熱電対は、R熱電対の劣化に及ぼす温度と使用時間の関係^[4]を参考に、使用積算時間が 1×10^4 時間以内で新規のものに交換すべきである。

(5) 負荷方法

負荷方法は、試験片の標点間によるひずみ制御を標準とする。ひずみ制御での試験において伸び検出器（25mm/F.S.）の出力が、約90%を越えても破断しない場合は、クロスヘッド制御に切り換えて試験を続行する。

負荷速度は、原則として試験開始時からひずみ1~3%までを0.3%/minとし、これ以降破断までは7.5%/minとする。

なお、負荷開始する前に負荷治具のクリアランス等を除去するため、必ず初荷重（25Kg程度）を加えてから試験を行うこと。

(6) 引張試験データ

各引張特性値を求めるために、X-T Yレコーダで連続的に応力-ひずみ曲線を測定記録する。

また、オンライン計測システム等が備わっている場合は、低速域 (0.3%/min) を 0.10~0.20 秒間隔で、高速域 (7.5%/min) を 0.50~1.00 秒間隔でデータ収集を行うことが望ましい。

(7) 破断後の寸法測定

① 丸棒試験片の計測

破断後の試験片の寸法測定は投影機等を使用して行う。図 2.1-8 に示すように破断した試験片を突き合わせる。ツバ間 (F') の測定は、ポンチマーク部を起点とし 180° 方向に 2 回測定する。試験片標点間 (GL') の測定は、測定誤差をなくすため計算により算出する [$GL' = F' - (F - GL)$]。また、直径の測定は突き合わせた最小となる部位 A を 90° 方向に 2 回測定する。この時、粘土等を用いて試験片を固定すると作業が容易になる。なお、突き合わせの時は、破断面に傷等を付けないように注意する。

② 板状試験片の計測

図 2.1-8 に示すように、ツバ間 (F') 及び試験片標点間 (GL') の測定は丸棒試験片と同様とする。最小断面積は突き合わせた最小の部位 (厚さ × 幅) とする。なお、最小断面積から求められる絞りは参考データとする。

③ 弧状試験片の計測

図 2.1-8 に示すように、ツバ間 (F') 及び試験片標点間 (GL') の測定は丸棒試験片と同様とする。最小断面積の求め方は板状試験片と同様とする。なお、最小断面積から求められる絞りは参考データとする。

また、特殊なケースとして、投影機を用いて破断面をトレースし、画像処理装置によって算出する方法もある。

(8) 破断位置の決定

図 2.1-9 に示すように母材及び溶接金属試験片の破断位置は、標点間内を 4 区間に分け、中央 2 区間を A、その外側各 1 区間を B、標点間外を C とする。この A, B, C の区分は、破断後の標点間の長さで考えてもよい。

溶接継手試験片の場合は、破断後の金属組織観察等により破断位置 (溶接金属 (WM)、境界部 (BOND)、熱影響部 (HAZ) または母材 (BM)) を決定する。

また、異材継手試験片の場合は、破断した鋼種も明示する。

(9) 試験片保管方法

寸法測定終了後、試験片を一本ずつペーパータオル等で包装し、試験片番号、試験条件等を明記したうえで所定のデシケータに保管する。

2.1.6 試験結果の報告

引張試験データの報告事項を以下に示す。また、代表的なデータシート及びグラフを Appendix2.1-7, 8 に記載した。

- (1) 素材（鋼種、ヒート No.）
- (2) 試験片の材質及び形状（試験片の履歴を含む）
- (3) 試験装置の概略仕様
- (4) 試験条件
 - ① 試験温度
 - ② 試験制御
 - ③ 試験速度
 - ④ 試験速度切換時のひずみ
- (5) 試験方法
- (6) 試験結果
 - ① 見かけの綫弾性係数
 - ② 比例限
 - ③ 降伏点又は耐力（0.2%）
 - ④ 引張強さ
 - ⑤ 一様伸び
 - ⑥ 破断延性（破断伸び、絞り）
 - ⑦ 破断位置
 - ⑧ 公称応力－ひずみ曲線、真ひずみ－真応力曲線、他
- (7) その他、試験中の異常の有無

2.1.7 試験結果のデータベース化

試験結果は、SMAT (FBR 構造材料データ処理システム) に入力する。Appendix2.1-9 に SMAT の概要を記載した。また、SMAT を利用し、各材料強度データを適宜データシートとして報告する。

2.1.8 引用規格

- | | | |
|-------------------|--------|-----------------------|
| ① JIS B 7721-1997 | 日本工業規格 | 「引張試験機－力の検証方法」 |
| ② JIS B 0031-1994 | 日本工業規格 | 「製図一面の肌の図示方法」 |
| ③ JIS B 0601-1994 | 日本工業規格 | 「表面粗さ－定義及び表示」 |
| ④ JIS B 7741-1999 | 日本工業規格 | 「一軸試験に使用する伸び計の検証方法」 |
| ⑤ JIS C 1602-1995 | 日本工業規格 | 「熱電対」 |
| ⑥ JIS G 0202-1987 | 日本工業規格 | 「鉄鋼用語（試験）」 |
| ⑦ JIS G 0567-1998 | 日本工業規格 | 「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」 |
| ⑧ JIS Z 2201-1998 | 日本工業規格 | 「金属材料引張試験片」 |
| ⑨ JIS Z 2241-1998 | 日本工業規格 | 「金属材料引張試験方法」 |
| ⑩ JIS Z 3001-1999 | 日本工業規格 | 「溶接用語」 |
| ⑪ JIS Z 3121-1993 | 日本工業規格 | 「突合わせ溶接継手の引張試験方法」 |
| ⑫ JIS Z 8401-1999 | 日本工業規格 | 「数値の丸め方」 |

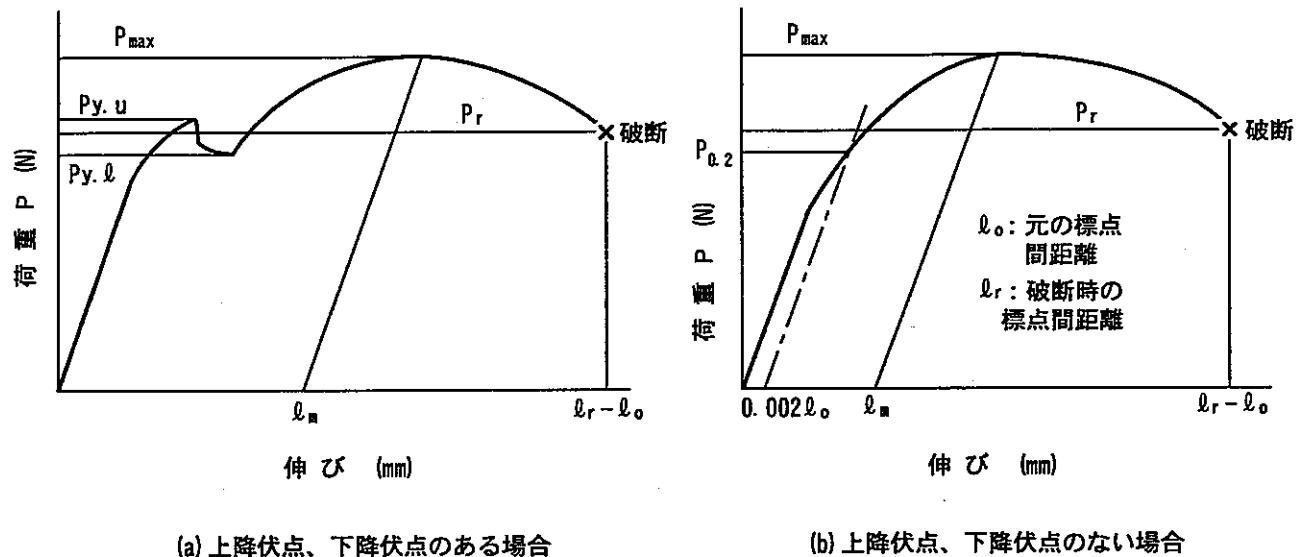
※ 発行年付きの引用規格は、その最新版を適用する。

表 2.1-1 引張試験に関する用語の定義

No.	用語	標準記号 (単位)	説明
1	試験温度 (Test Temperature)	T (°C)	試験中の平均温度
2	公称ひずみ速度 (Nominal Strain Rate)	$\dot{\epsilon}$ (%/min)	標点間の平均の公称ひずみ速度、標点間のひずみを測定できない場合には、クロスヘッド間変位から相当速度として算出する。
3	0.2% 耐力 (0.2% Offset Yield Strength)	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	伸び計を用いて荷重ー伸び線図を求め、伸び軸上の標点間距離の0.2%に相当する点から付図2.1-1に示すように試験初期の直線部分に平行線を引き、これが線図と交わる点の示す荷重P _{0.2} (N)を試験片平行部の原断面積A ₀ (mm ²)で除した応力(N/mm ²)。 $\sigma_{0.2} = P_{0.2} / A_0$
4	引張強さ (Ultimate Tensile Strength)	σ_B (N/mm ²)	付図2.1-1に示すように、荷重ー伸び線図における最大引張荷重P _{max} を平行部原断面積A ₀ で除した応力。 $\sigma_B = P_{max} / A_0$
5	一様伸び (Uniform Elongation)	$\epsilon_{unif}^{(1)}$ (%)	試験片平行部がほぼ一様に変形する永久伸びの限界値で、最大引張荷重に対応する永久伸びとして求める(付図2.1-1参照)。 $\epsilon_{unif}^{(1)} = \ell_w / \ell_0 \times 100 (%)$
		$\epsilon_{unif}^{(2)}$ (%)	破断部よりはなれた位置における断面積A'と元の平行部断面積Aを用いた次の式で求める。なお、この値は指定された場合のみ求めるものである。 $\epsilon_{unif}^{(2)} = (A - A') / A' \times 100 %$
6	破断伸び (Fracture Elongation)	δ (%)	破断後突き合わせして求めた標点間距離ℓより元の標点間距離ℓ ₀ を引いたものをℓ ₀ で除したもの(付図2.1-1参照)。 $\delta = (\ell - \ell_0) / \ell_0 \times 100 (%)$
7	絞り (Reduction of Area)	ψ (%)	試験片平行部原断面積A ₀ より破断部の最小断面積Aを引いたものをA ₀ で除した値。 $\psi = (A_0 - A) / A_0 \times 100 (%)$
8	見かけの綫弾性係数 (Apparent Elastic Modulus)	E _a (N/mm ²)	荷重ー伸び線図における試験初期の直線部分の下限と上限の範囲内の値を最小二乗法で算出する。

表 2.1-1 (続き) 引張試験に関する用語の定義

No.	用語	標準記号 (単位)	説明
9	破断位置 (Fracture Location)	—	試験片が破断する時点での通常標点間の中心との相対関係により A, B 及び C で示す。このようないわゆる明示方法については図 2.1-9 に示す通りである (JIS Z 2241 準拠)。なお、溶接継手及び異材継手の場合も 2.1.5(8) 項に示す通りである。
10	降伏点 (Yield Strength)	σ_y	試験片がすべり現象に起因して降伏する場合の応力が降伏点であり、降伏開始点のそれを上降伏点 (P_y / A_0)、降伏が進展する過程のそれを下降伏点 ($P_y / l / A_0$) であり、付図 2.1-1 に示す通りである。
11	4D の伸び (Elongation in 4D)	δ_{4D} (%)	標点間距離を 4D とした場合の破断伸びである指定された場合のみ求めるものとする。
12	真破断応力 (True Fracture Stress)	σ_f^* (N/mm ²)	破断荷重 P_f を破断部の最小断面積 A で除した値である (付図 2.1-1 参照)。 $\sigma_f^* = P_f / A$
13	公称応力 (Nominal Stress)	σ (N/mm ²)	対象とする各段階における荷重 P を原断面積 A_0 で除した値である。 $\sigma = P / A_0$
14	公称ひずみ (Nominal Strain)	ε (%)	対象とする各段階における標点間距離 l より元の標点間距離 l_0 を減じたものを l_0 で除した値である。 $\varepsilon = (l - l_0) / l_0 \times 100 (%)$
15	真応力 (True Stress)	σ^* (N/mm ²)	対象とする各段階における荷重 P を各段階における最小断面積で除した値である。 $\sigma^* = \sigma (1 + \varepsilon / 100)$
16	真ひずみ (True Strain)	ε^* (%)	対象とする各段階における標点間距離 l を基準にして求められるひずみである。 $\varepsilon^* = l_0 (1 + \varepsilon_{unif} / 100) \times 100$
17	真一様伸び (True Uniform Elongation)	ε_{unif}^* (%)	対象とする各段階における標点間距離 l を基準にして求められる一様伸びである。 $\varepsilon_{unif}^* = l_0 (1 + \varepsilon_{unif} / 100) \times 100$
18	真破断延性 (True Fracture Ductility)	ε_f^* (%)	破断時の真ひずみである $\varepsilon_f^* = l_0 (100 / 100 - \varepsilon) \times 100$ ここで ε は絞りである。



付図2.1 荷重-伸び線図の一般例

表 2.1-2 試験温度の目標範囲

試験温度 (°C)	目標範囲 (°C)	JIS 許容範囲 (°C)
600 以下	± 2	± 3
600 を超え 800 以下		± 4
800 を超え 1000 以下		± 5
1000 以上	± 3	当事者間の協定

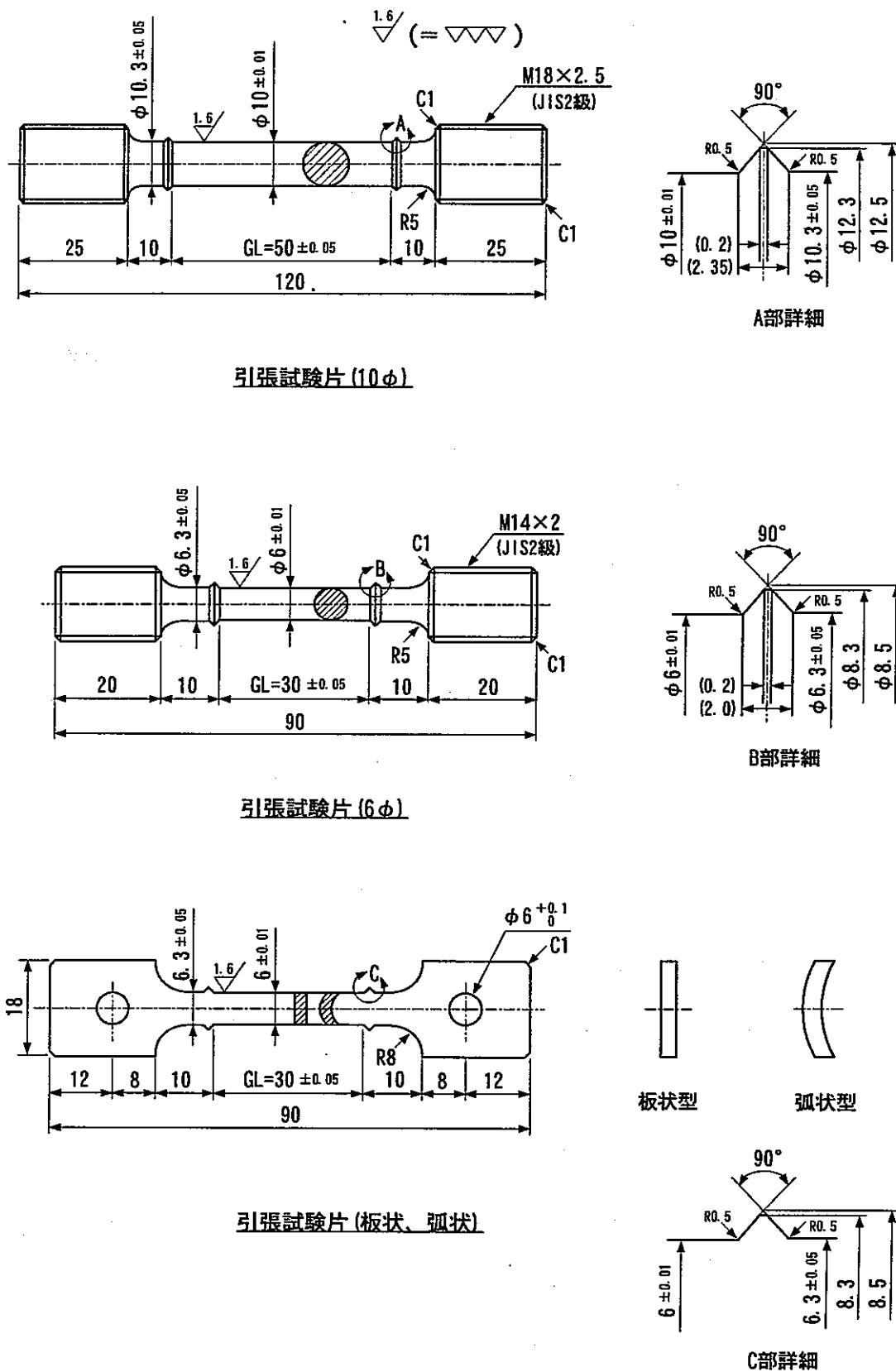


図2.1-1 引張試験片外観図

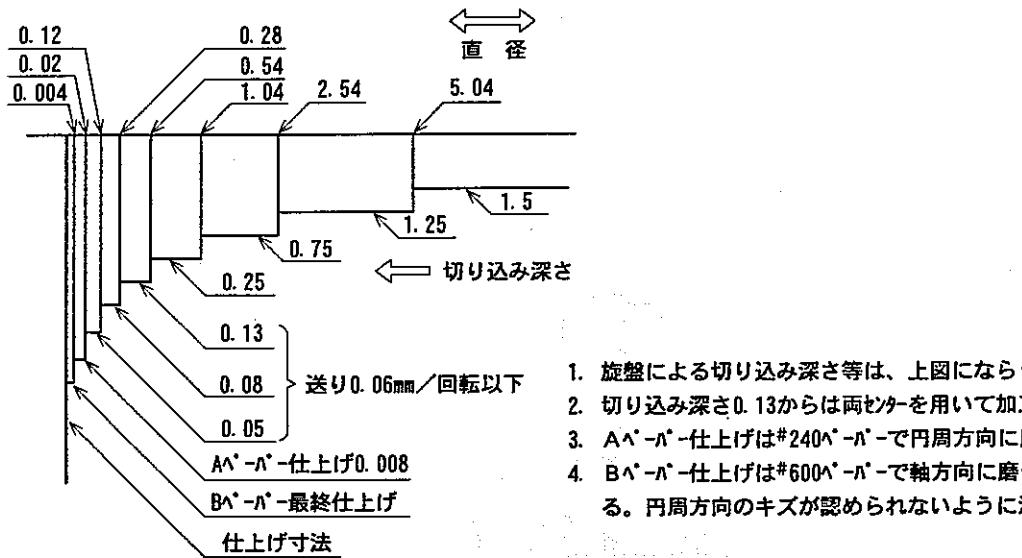
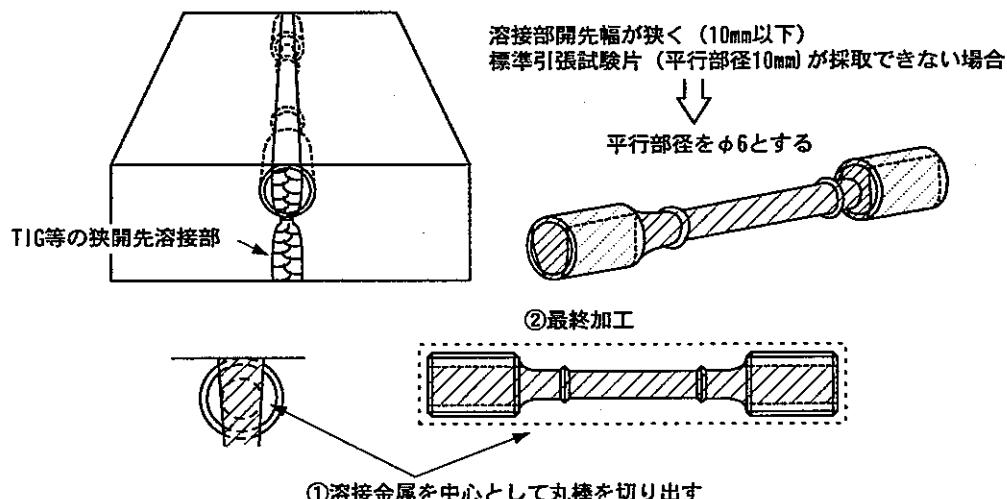
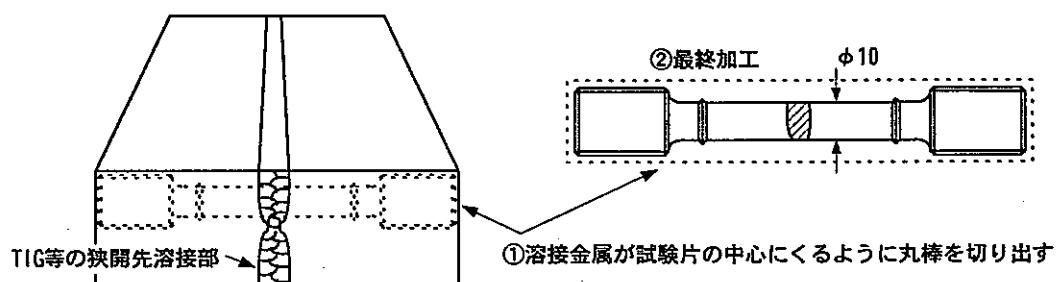


図2.1-2 試験片平行部加工要領



・狭開先溶接部よりの溶接金属引張試験片の製作例



・狭開先溶接部よりの溶接継手引張試験片の製作例

図2.1-3 特殊引張試験片の製作例

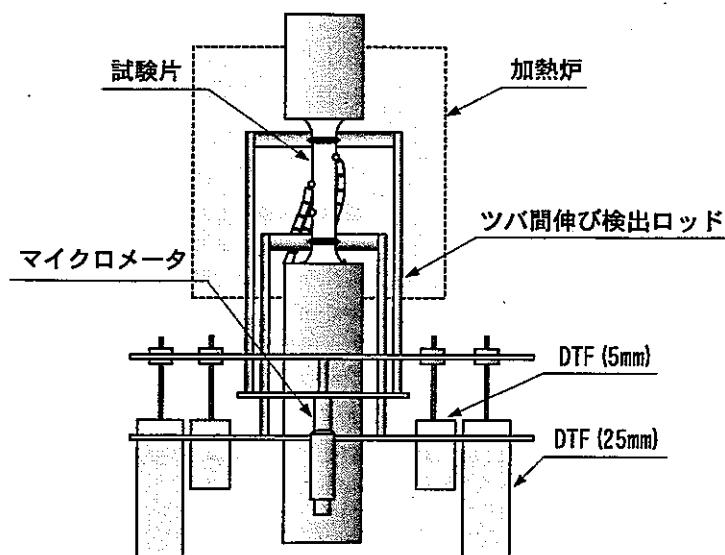


図2.1-4 アームショルダー型伸び計の取り付け図

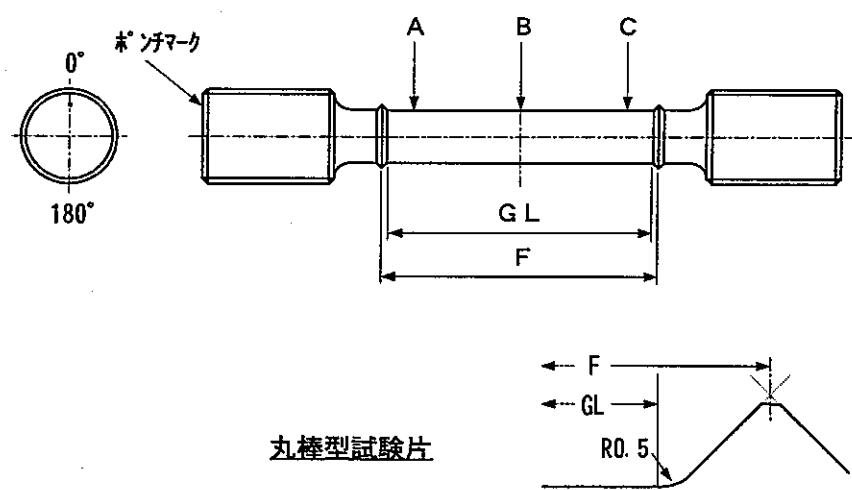
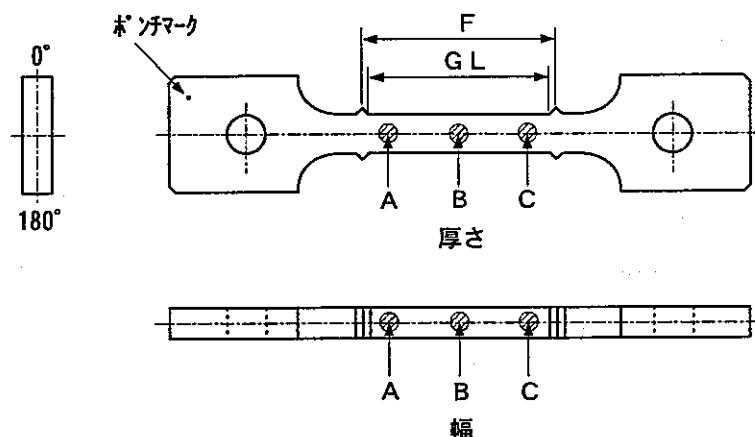
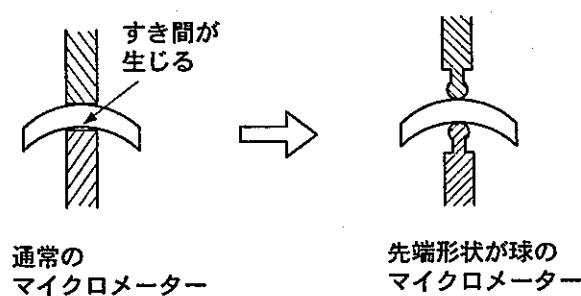
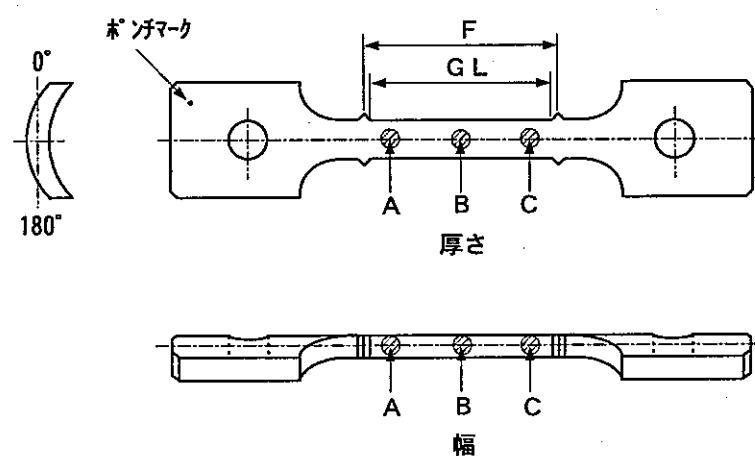


図2.1-5 引張試験片寸法測定箇所 (1/2)



板状型試験片



弧状型試験片

図2.1-5 引張試験片寸法測定箇所 (2/2)

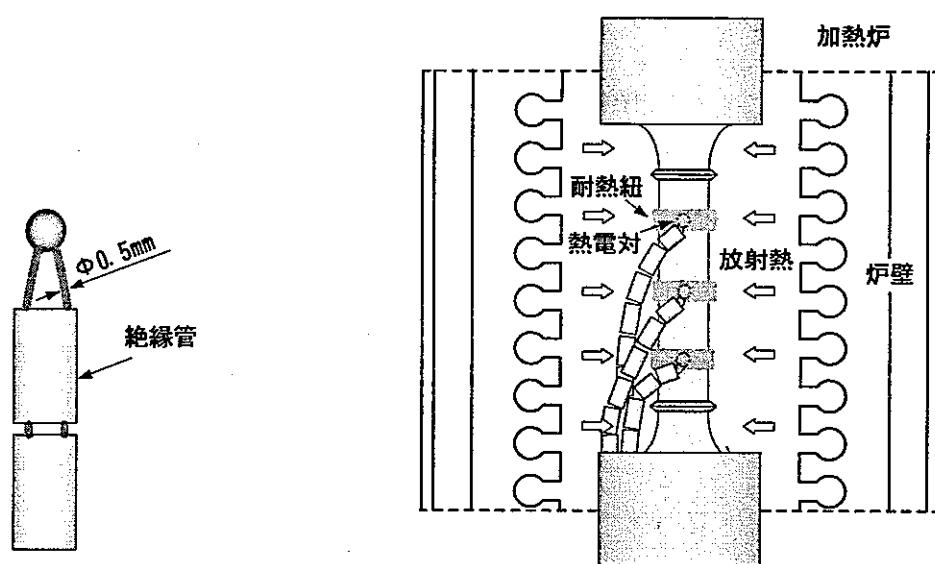


図2.1-6 热電対先端部の形状

図2.1-7 放射熱による計測誤差の防止

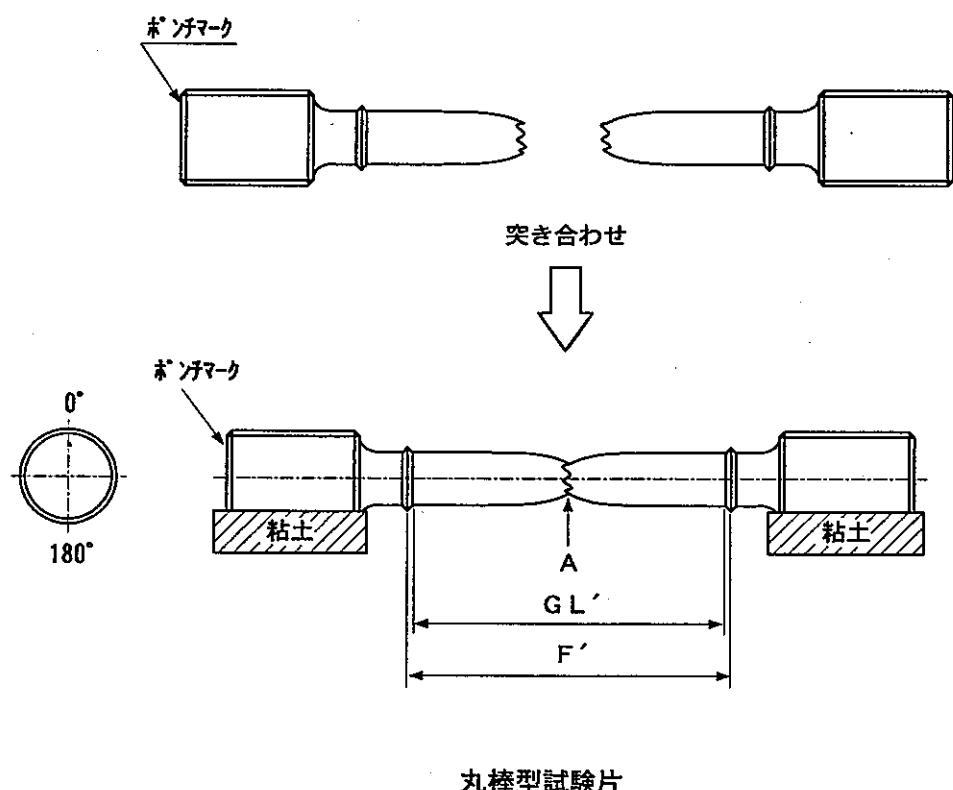
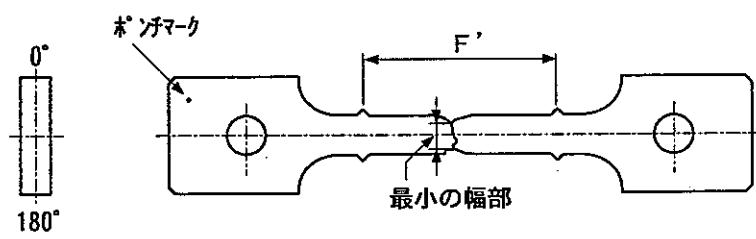
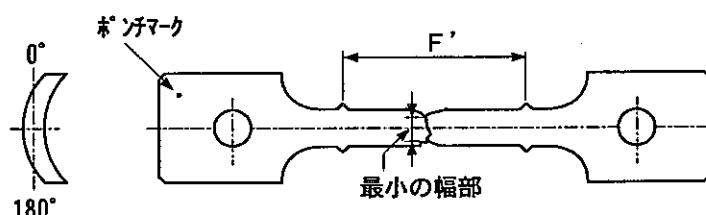


図2.1-8 破断後の寸法測定箇所 (1/2)



板状型試験片



弧状型試験片

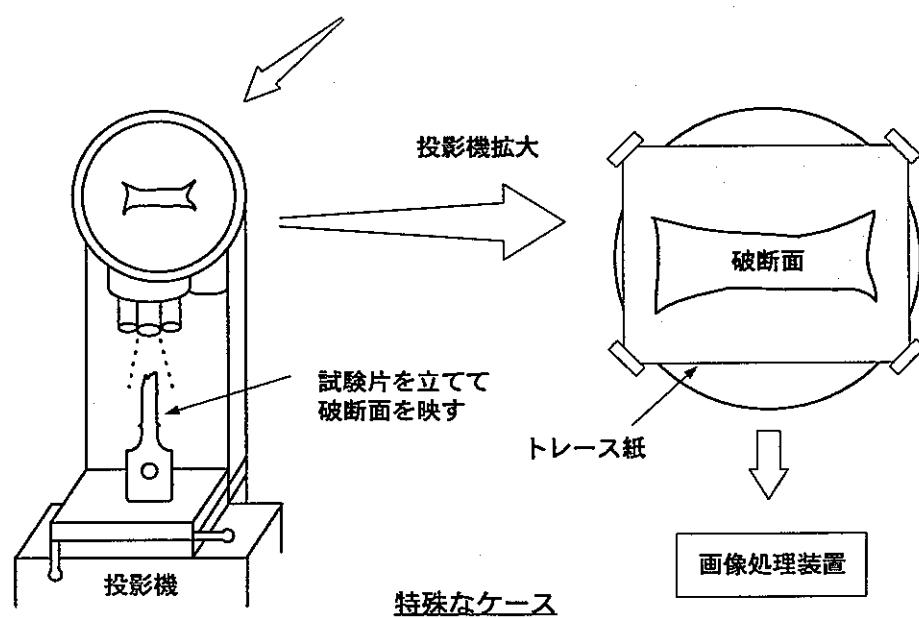
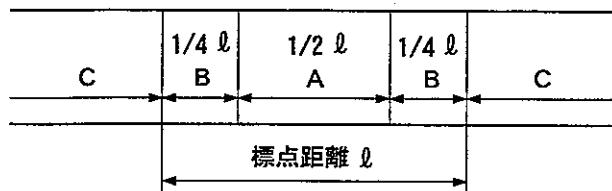
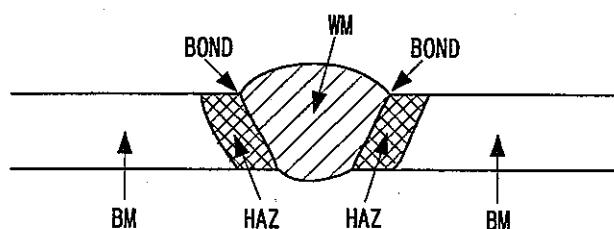


図2.1-8 破断後の寸法測定箇所 (2/2)



母材及び溶接金属試験片



溶接継手試験片

図2.1-9 破断位置の明示方法

2.2 クリープ試験（含クリープ破断試験）

2.2.1 適用範囲

本章の規定はF B R金属材料のクリープ試験及びクリープ破断試験に適用するものである。

2.2.2 用語の定義

本試験において用いられる用語の定義を表2.2-1に示す。

なお、単位の表示はJISに従い国際単位系（SI）を用いる。ただし、本要領書作成前から継続して試験を実施している場合は、荷重及び応力を従来単位（kg, kg/mm²）に換算して求めてよいものとする。

2.2.3 試験片

本試験において使用する試験片は原則として、JIS Z 2271に準じるものとする。

なお、標点距離(GL)はツバの内側間の長さとする。

試験材料は、高速炉用構造材料の均一な金属組織を有する板、鍛造品、管及び棒材等並びに、これらの溶接金属や継手材料等を対象とする。

(1) 試験片形状

試験片は、図2.2-1に示すように原則として円形断面とし、ツバ付き中実丸棒型を標準とする。

平行部直径は10φを標準とするが、6φ、8φまたは12φのものを使用してもよい。試験片平行部の長さは5D(D:平行部直径)とし、これを標点距離とする。

また、円形断面の試験片を採取することができない場合は、板状試験片及び管(伝熱管)そのままの形状を八つはし状に加工した弧状型試験片を使用しても差し支えない。

なお、標準試験片以外の形状、寸法のものを使用する場合は、別途協議の上決定する。

(2) 採取位置

第2.1項引張試験と同様である。

(3) 加工方法

第2.1項引張試験と同様である。

(4) 特殊試験片の製作

第2.1項引張試験と同様である。

2.2.4 試験装置

本試験に使用する試験装置は、JIS Z 2271に適合するものでなければならない。

当Grには容量3ton, 1.5ton, 0.75tonの縦型單てこ荷重式と容量5tonの縦型二重てこ荷重式のクリープ試験装置が設置されており、試験の用途に応じて使い分けている。

本装置は、試験装置本体、伸び測定装置、加熱装置、記録装置等から構成される。当Grに設置されている試験装置の仕様をAppendix2.2-1に、構成図をAppendix2.2-2に示す。

(1) 試験装置本体

外力に対し充分な剛性をもつ本体フレーム及び試験時荷重方向が軸芯と一致する構造の荷重装置等により構成されるものとする。また、荷重精度は負荷容量の5~100%の範囲で±0.5%以内とする。

(2) 試験片つかみ部（チャック）

つかみ部は試験片の軸芯を保証する形状であり、引張力以外の力が加わらない構造のものとする。

つかみ部は、丸棒型試験片はネジ式、板状及び弧状型試験片はピン式が望ましい。また、つかみ部の材質は試験温度範囲においてゆるみや焼き付きがなく引張荷重を負荷できる耐熱合金とする。

Appendix2.2-3に試験片つかみ部の外観図を示す。

(3) 伸び測定装置

試験片の軸方向の伸びを測定できるもので、JIS B 7741の等級1級以上とする。

試験片標点間の伸びはアームショルダー型伸び計（図2.2-2参照）等にて測定する。

(4) 加熱装置

加熱装置は試験片を試験目的に応じた試験温度まで高温加熱するためのものであり、電気ヒータ加熱炉方式が望ましい。温度検出用熱電対は、JIS C 1602によるものとし、直径0.5φのR熱電対（JIS階級クラス2）を標準とする。また、温度制御はP I D調節式とする。

(5) 記録装置

伸び、温度の測定は、アナログレコーダやオンラインデータ収集システムにより行う。

① レコーダ

アナログレコーダにより、標点間伸び及び温度の時間変化を記録する。

② オンラインデータ収集システム

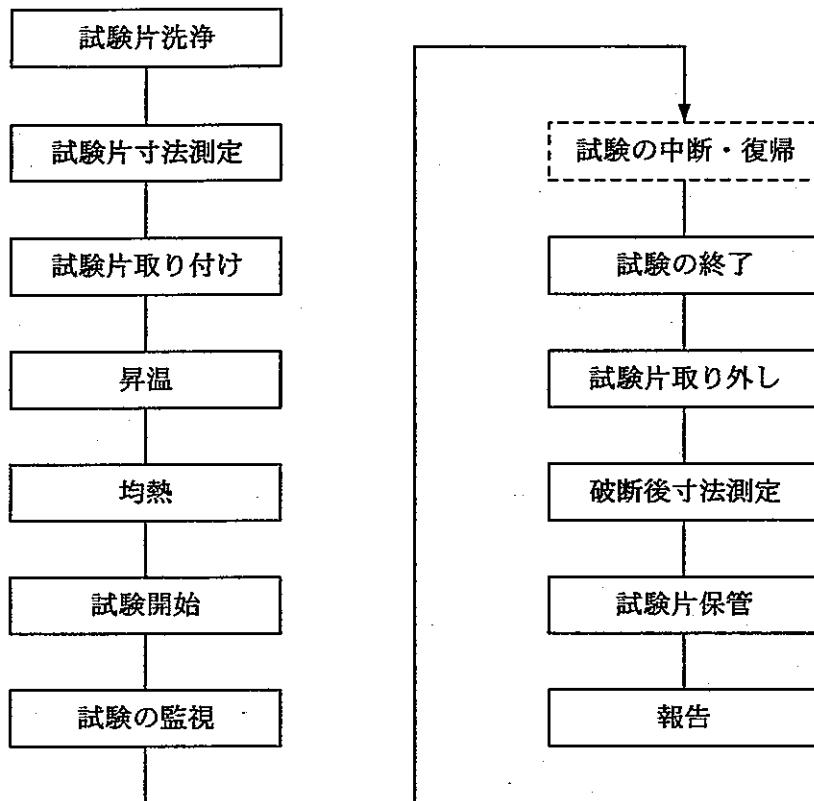
本システムにより、試験装置から出力される温度及び伸びデータを数秒毎にサンプリングするとともに運転状況を監視する。

Appendix2.2-4にオンラインデータ収集システムの構成を示す。

2.2.5 試験方法

試験温度、負荷方法、伸びの測定方法などについては JIS Z 2271 に従うものとする。

クリープ試験の標準的な試験手順を以下に示す。



(1) 試験片洗浄

第 2.1 項引張試験と同様である。

(2) 試験片寸法測定

第 2.1 項引張試験と同様である。

(3) 試験片取り付け

試験片の取り付けに際しては、ねじり及び曲げ等の負荷が試験片にかかるないようにする。

(4) 加熱方法

試験時は、熱電対を試験片平行部の上、中、下 3 点に耐熱紐にて縛り付ける。試験片を電気炉等にて加熱し、熱電対 3 点の温度を表 2.2-2 の目標範囲内になるように調整する。熱電対の先端の形状及び放射熱による計測誤差の防止に関しては、第 2.1 項引張試験と同様である。

昇温時間は 1 時間以上 4 時間以内で、試験温度に達してから試験片を熱平衡状態にするための均

熱時間は16～24時間以内を標準とする。

熱電対は、R熱電対の劣化に及ぼす温度と使用時間の関係^[4]を参考に、試験温度が550℃以下の時は10年以内、550℃を超える時は 1×10^4 時間以内に新規のものに交換すべきである。なお、使用限度積算時間を超えた熱電対は改鑄して再度利用する。

(5) 負荷方法

負荷方法は段階負荷を標準とする。均熱を保った後、試験装置の作動を確かめるため試験荷重の10%以下の重錘を載せ数分間保持する。その後、その荷重の範囲内で負荷及び除荷を行った後、負荷中のクリープひずみを最小にするために、できるだけ速やかに試験荷重を負荷する。負荷完了時点を試験開始時間とする。図2.2-3に段階負荷方法の概略図を示す。

(6) クリープ試験データの記録

アナログレコーダ等により、クリープひずみ、温度の時間変化を記録する。

また、オンラインデータ収集システムが備わっている場合は、クリープひずみ及び温度の測定は、表2.2-3に示す測定間隔が望ましい。

(7) 試験の監視

試験開始直後の数分間は、温度、伸び等に異常のないことを確認する。その後は、定期的な監視を試験終了まで行う。

(8) 試験の中止・復帰方法

試験中何らかの異常により中断した場合は、その原因を除去し、すみやかに再復帰する。ただし、伸びの著しい変化や温度上昇等、強度評価上の問題が確認された場合は試験を中止する。

停電等によって試験を中断（加熱炉の電源を遮断）する場合は、重錘を負荷したままの状態にする。また、試験復帰時（加熱炉電源投入時）も重錘負荷状態を保持し、試験片の温度がJISの許容範囲に入った時点を試験再開とする。

なお、このような中断・復帰の履歴は、試験データと共に報告する。

(9) 試験の終了

目標の試験時間達成時及び試験片破断時を試験の終了とし、負荷完了の時点からクリープ破断または試験時間達成に至るまでの時間を破断時間または試験時間とする。但し、試験途中で中断した時間は差し引くものとする。

(10) ひずみ補正処理

図2.2-4に示すように試験中のひずみ挙動データは、地震、レバー位置調整及び伸び計調整等が原因で変化が生じることがある。このようなデータに関しては、ひずみの補正処理を行う。

なお、補正処理の履歴は、データと共に保管する。

(11) 破断後寸法測定

第 2.1 項引張試験と同様である。

(12) 試験片の保管

第 2.1 項引張試験と同様である。

(13) 破断位置の決定

第 2.1 項引張試験と同様である。

2.2.6 試験結果の報告

クリープ試験データの報告事項を以下に示す。また、代表的なデータシート及びグラフを Appendix 2-5, 6, 7 に記載した。

(1) 素材 (鋼種、ヒート No.)

(2) 試験片の材質及び形状 (試験片の履歴を含む)

(3) 試験装置の概略仕様

(4) 試験条件

① 試験温度

② 試験温度が許容範囲から外れた場合の指示温度

③ 応力

④ 升温時間

⑤ 均熱時間

(5) 試験方法

(6) 試験結果

① ひずみ-時間線図

② 負荷時間、負荷完了時ひずみ、定常クリープ速度、1次クリープひずみ、2次クリープ開始時間とひずみ及び3次クリープ開始時間とひずみ

③ 破断時間

④ 破断伸び、絞り

⑤ 破断位置、他

(7) その他、試験中の異常の有無

2.2.7 試験結果のデータベース化

第 2.1 項引張試験と同様である。

2.2.8 引用規格

- ① JIS B 0031-1994 日本工業規格 「製図一面の肌の図示方法」
- ② JIS B 0601-1994 日本工業規格 「表面粗さ－定義及び表示」
- ③ JIS B 7741-1999 日本工業規格 「一軸試験に使用する伸び計の検証方法」
- ④ JIS C 1602-1995 日本工業規格 「熱電対」
- ⑤ JIS G 0202-1987 日本工業規格 「鉄鋼用語（試験）」
- ⑥ JIS Z 2271-1999 日本工業規格 「金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法」
- ⑦ JIS Z 8401-1999 日本工業規格 「数値の丸め方」

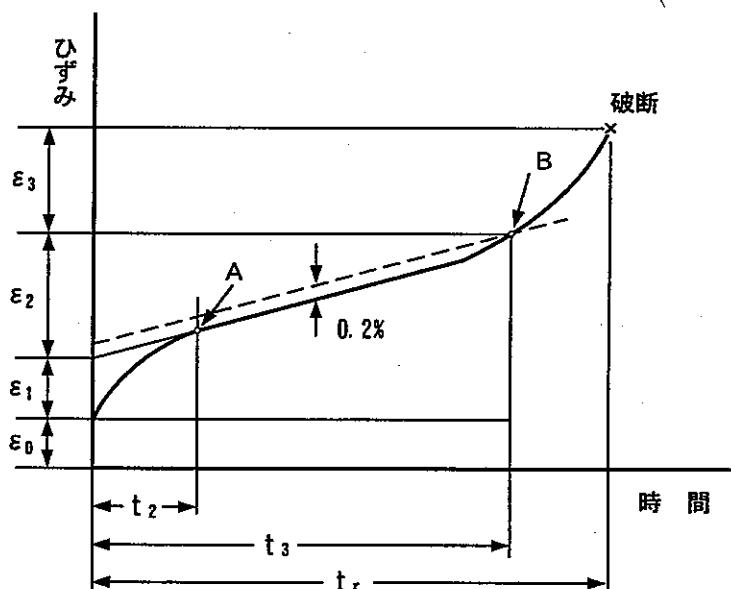
※ 発行年付きの引用規格は、その最新版を適用する。

表 2.2-1 クリープ試験及びクリープ破断試験に関する用語の定義

No.	用語	標準記号 (単位)	説明
1	試験温度 (指定温度) (Test Temperature)	T (°C)	試験期間中の平均温度
2	応力 (Stress)	σ (N/mm ²)	試験荷重Pを平行部原断面積A ₀ で除した値。 $\sigma = P / A_0$
3	負荷完了時のひずみ (Strain on Load)	ε_0 (%)	試験温度に到達した後の試験荷重負荷完了時のひずみ。 (弾性ひずみ) + (非弾性ひずみ)
4	全ひずみ (Total Strain)	ε_t (%)	(負荷完了時ひずみ) + (クリープひずみ)
5	クリープひずみ (Creep Strain)	ε_c (%)	(全ひずみ) - (負荷完了時ひずみ)
6	1次クリープひずみ (Primary Creep Strain)	ε_1 (%)	クリープ曲線の直線部を時間零側に延長し、縦軸との交点での全ひずみから、負荷完了時ひずみ ε_0 を差し引いたひずみ。 (付図 2.2-1 参照)
7	2次クリープひずみ (Secondary Creep Strain)	ε_2 (%)	3次クリープ開始時点Bでの全ひずみから、負荷完了時ひずみ及び1次クリープひずみを差し引いたひずみ (付図 2.2-1 参照)。
8	3次クリープひずみ (Tertiary Creep Strain)	ε_3 (%)	破断伸び (ひずみ) から、負荷完了時ひずみ、1次クリープひずみ及び2次クリープひずみを差し引いたひずみ (付図 2.2-1 参照)。
9	2次クリープ開始時間 (Time to Secondary Creep)	t_2 (hr)	試験荷重負荷完了時からひずみ速度が一定となり始める時点Aまでの時間 (付図 2.2-1 参照)。
10	3次クリープ開始時間 (Time to Tertiary Creep)	t_3 (hr)	試験荷重負荷完了時からひずみ速度が加速的に増加し始める時点までの時間。ここではクリープ曲線の直線部を時間ゼロに延長して縦軸との交点のひずみに標点距離の 0.2% のひずみを加え、その点からクリープ曲線の直線部に平行に直線を延長して求められるクリープ曲線との交点Bまでの時間とする (付図 2.2-1 参照)。
11	定常クリープ速度 [Steady (Secondary) Creep Rate]	$\dot{\varepsilon}_s$ (%/hr)	クリープ曲線の傾きが一定となる直線部でのひずみ速度。
12	破断時間 (Rupture Time)	t_r (hr)	試験荷重負荷完了の時点からクリープ破断にいたるまでの時間。

表 2.2-1 (続き) クリープ試験及びクリープ破断試験に関する用語の定義

No.	用語	標準記号 (単位)	説明
13	破断伸び (Fracture Elongation)	δ (%)	破断後突き合わせによって求めた標点距離 ℓ より試験前の標点距離 ℓ_0 を差し引いた値を ℓ_0 で除した値。 $\delta = (\ell - \ell_0) / \ell_0 \times 100$
14	絞り (Reduction of Area)	ψ (%)	平行部原断面積 A_0 より破断部最小断面積 A を差し引いた値を A_0 で除した値。 $\psi = (A_0 - A) / A_0 \times 100$
15	破断位置 (Fracture Location)		第 2.1 項引張試験の規定に準拠する。
16	標点距離 (Gauge Length)	ℓ_0 (mm)	ひずみを算出するための基準点間の長さ：ツバ付き試験片の場合、原則としてツバの内側間の長さとし、詳細は図 2.2-1 の通りとする。



付図2.2-1 クリープ曲線の模式的説明

表 2.2-2 試験温度の目標範囲

試験温度 (°C)	目標範囲 (°C)	JIS 許容範囲 (°C)
900 以下	± 2	± 3
900 を超え 1000 以下		± 4

表 2.2-3 クリープデータ測定間隔 (推奨値)

開始時間 (hr)	終了時間 (hr)	測定間隔 (hr)	データ個数	累積データ個数
0	0.2	0.01	20	20
0.2	1	0.05	16	36
1	2	0.1	10	46
2	10	0.5	16	62
10	100	2.0	45	107
100	1000	10.0	90	197
1000	5000	20.0	200	397
5000	10000	50.0	100	497
10000	200000	100.0	1900	2397

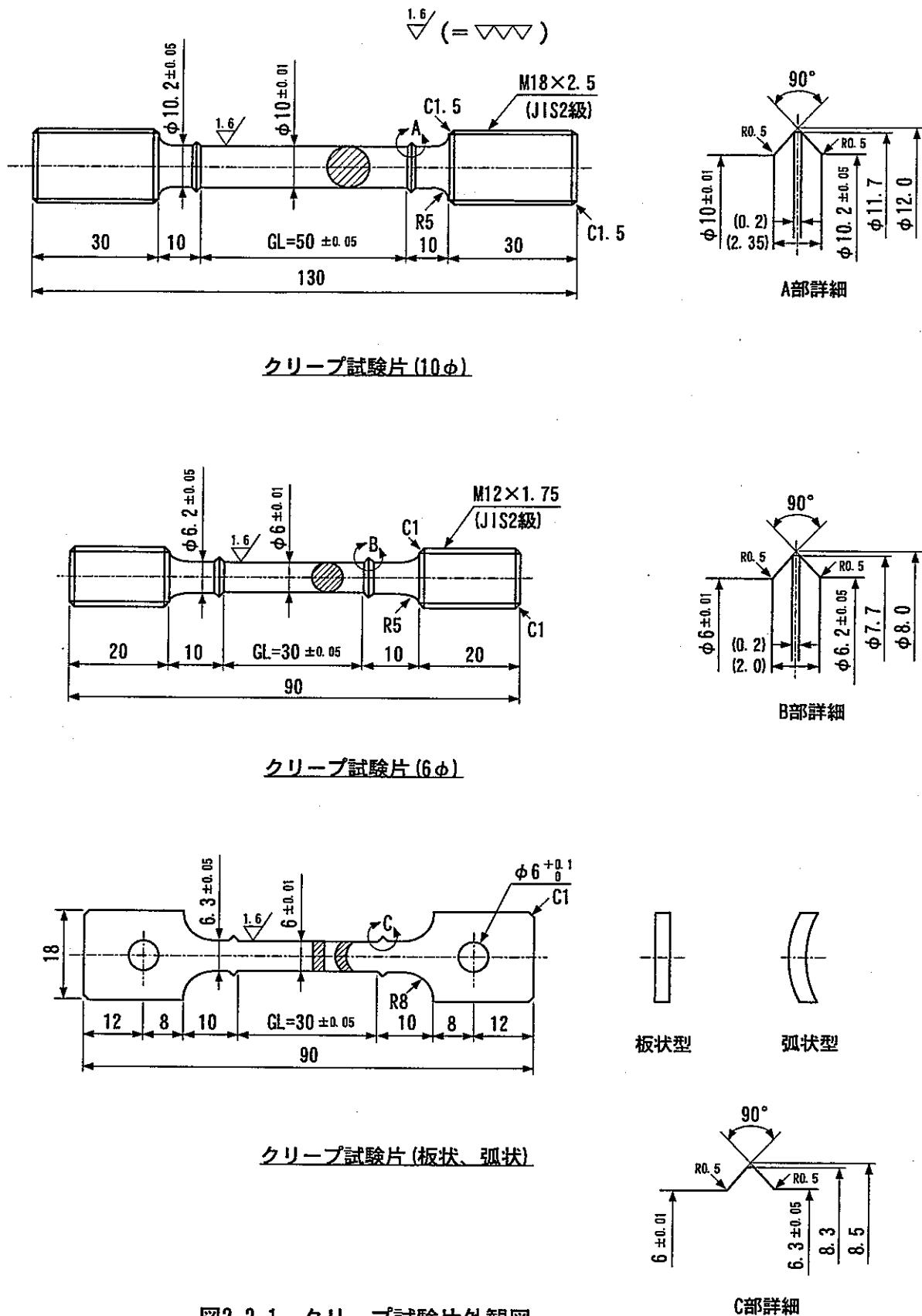


図2.2-1 クリープ試験片外観図

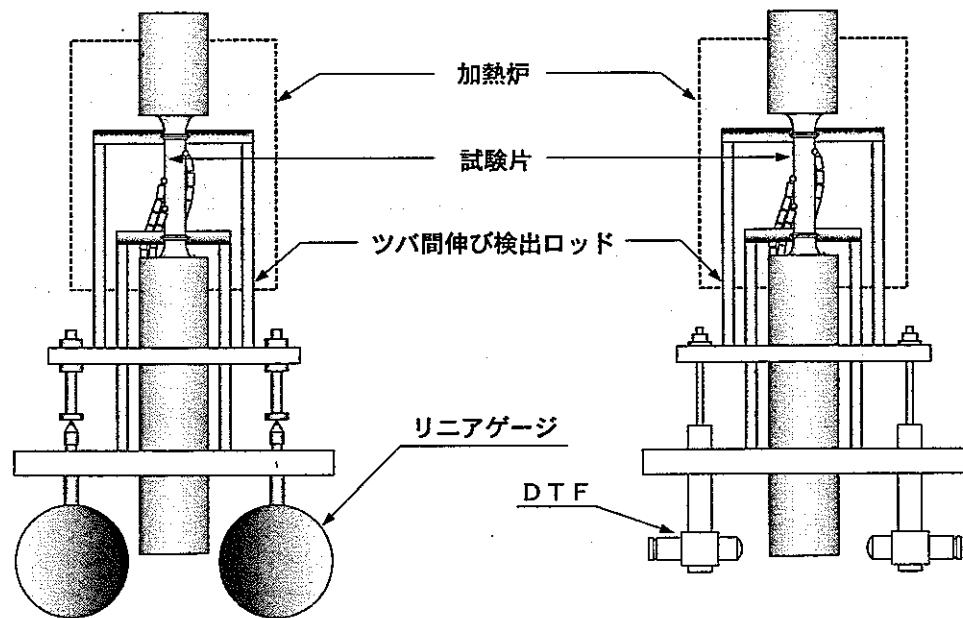


図2.2-2 アームショルダー型伸び計の取り付け図

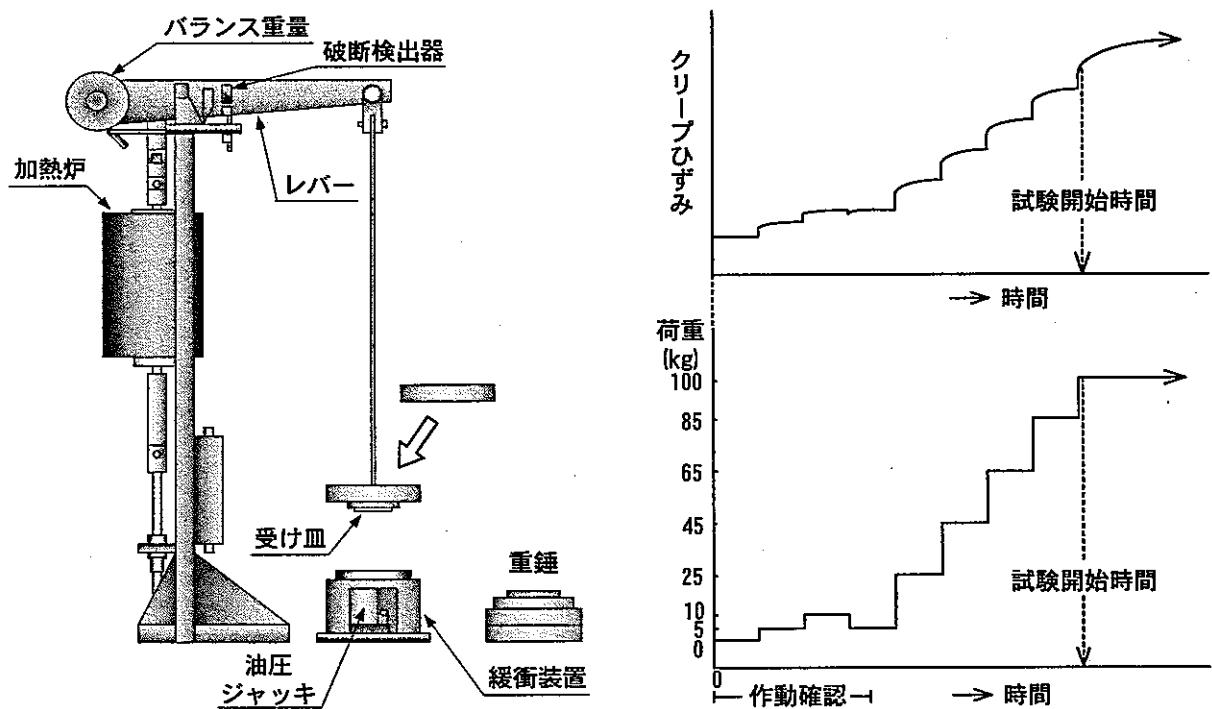


図2.2-3 段階負荷方法

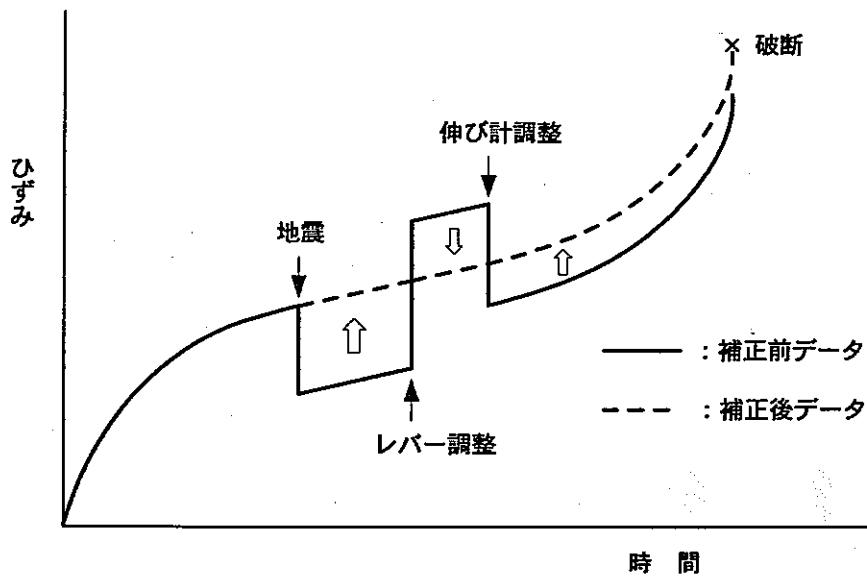


図2.2-4 クリープ曲線のひずみ補正処理

2.3 リラクセーション試験

2.3.1 適用範囲

本章の規定はF B R金属材料のリラクセーション試験に適用するものである。

2.3.2 用語の説明

本試験において用いられる用語の説明を表2.3-1に示す。

なお、単位の表示はJISに従い国際単位系(SI)を用いる。

2.3.3 試験片

試験材料は、高速炉用構造材料の均一な金属組織を有する板、鍛造品、管及び棒材等並びに、これらの溶接金属や継手材料等を対象とする。

(1) 試験片形状

本試験において使用する標準試験片は、図2.3-1に示すようなツバ付き中実丸棒で平行部直径は10φを原則とするが、6φ、8φまたは12φを使用してもよい。標点距離はいずれも原則として100mmとする。

リラクセーション試験は、制御対象とするひずみが±0.5μmといった微小ひずみであるために、標点距離が短く、かつ、全ひずみの値が小さくなると、伸びの検出感度に起因する全ひずみの変動範囲は大きくなる。よって、レバータイプ試験装置においては標点距離100mmを標準としている。

なお、標準試験片以外の形状、寸法のものを使用する場合は、別途協議の上決定する。

(2) 採取位置

第2.1項引張試験と同様である。

(3) 加工方法

第2.1項引張試験と同様である。

(4) 特殊試験片の製作

第2.1項引張試験と同様である。

2.3.4 試験装置

本試験に使用する試験装置はJIS Z 2276に適合するものでなければならない。

リラクセーション試験装置はレバータイプの自動平衡型試験装置が望ましい。荷重制御は重錘と送錘でもって行い、両者の重量調整は分銅を取り替えて行う構造である。

本装置は、試験装置本体、伸び測定装置、加熱装置、記録装置等から構成される。当Grに設置されている試験装置の仕様をAppendix2.3-1に、構成図をAppendix2.3-2に示す。

なお、数百時間の試験においては油圧サーボ型疲労試験装置においても実施可能であるが、試験片形状等が JIS の規定を外れるため留意する必要がある。

(1) 試験装置本体

試験装置本体は、試験時荷重方向が軸芯と一致し高精度を維持する構造とし、試験荷重を試験片に負荷する荷重負荷装置、荷重レバーに取り付けた送錐部、チャック間隔、レバー水平位置の調整を行う下部プルロッド調整部等により構成される。また、負荷精度は±0.5%以内とする。

(2) 試験片つかみ部（チャック）

つかみ部は試験片の軸芯を保証する形状であり、ネジ式のものが望ましい。また、つかみ部の材質は試験温度範囲においてゆるみや焼き付きがなく引張荷重負荷ができる耐熱合金とする。

Appendix2.3-3 に試験片つかみ部の外観図を示す。

(3) 伸び測定装置

試験片標点間の伸びはアームショルダー型伸び計（デジタルリニアゲージ）等にて測定する。リラクセーション試験中のひずみ一定保持は、伸び計にて検出した伸びと設定ひずみとの偏差量を荷重負荷装置に伝達することにより行う。図 2.3-2 にアームショルダー型伸び計の外観図を示す。

(4) 加熱装置

加熱装置は試験片を試験目的に応じた試験温度まで高温加熱するためのものであり、電気ヒータ加熱炉方式が望ましい。温度検出用熱電対は、JIS C 1602 によるものとし、直径 0.5φ の R 热電対 (JIS 階級クラス 2) を標準とする。また、温度制御は P I D 調節式を用いる。

(5) 記録装置

応力、ひずみ、偏差及び温度の計測には、レコーダやオンラインデータ収集システムを用いる。

① レコーダ

X-T レコーダにより、応力、ひずみ及び偏差を、温度記録計により温度の時間変化を記録する。

② オンラインデータ収集システム

本システムにより応力-ひずみを時系列でサンプリングし、また、試験機の運転監視を行う。 Appendix2.3-4 にオンラインデータ収集監視システムの接続概略図を示す。

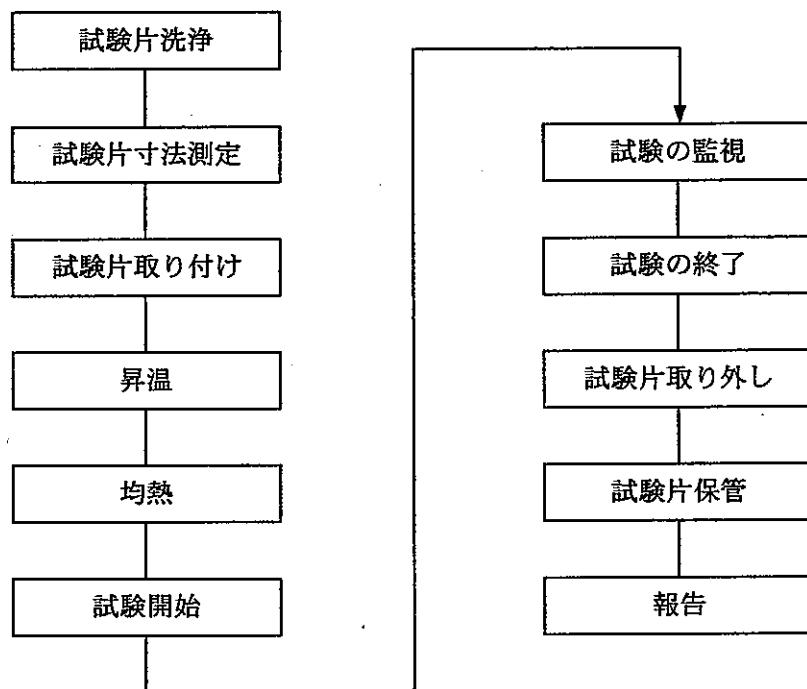
(6) 試験装置設備環境

試験装置及び各種検出器はデータの信頼性、品質向上を得る目的で試験期間中、常に一定の環境に維持することが必要である。リラクセーション試験は制御ひずみが ±0.5 μm と極めて微小なため、試験装置周辺の雰囲気温度や周辺の大気の流動による影響を受け易い。このため、試験室全体の室温変動を ±2°C 以内に調整し、試験装置の周辺を二重の風防カバーで覆うことにより試験装置

周辺の温度変動幅を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内に維持することが望ましい。これらは図 2.3-3 に示すように、空調設備による室内の温度変動によって起こる荷重の変動を防止し、正確なリラクセーション挙動データを取得するためである。

2.3.5 試験方法

試験温度、負荷方法、伸び、荷重の測定方法などについては JIS Z 2276 に従うものとする。
リラクセーション試験の標準的な試験手順を以下に示す。



(1) 試験片洗浄

第 2.1 項引張試験と同様である。

(2) 試験片寸法測定

第 2.1 項引張試験と同様である。

(3) 試験片取り付け

試験片の取り付けに際しては、ねじり及び曲げ等の負荷が試験片にかかるないようにする。

(4) 加熱方法

第 2.2 項クリープ試験と同様である。

(5) 負荷方法

均熱を保った後、重錘により初期荷重の 10%以下に相当する荷重をかけ、その荷重の全部または一部を除荷して試験装置の作動を確認する。その後ひずみ量が設定値になるまで送錘を速やかに移動させ試験を開始する。試験中のひずみ制御精度は、±1.5%以内とする。

図 2.3-4 に示すように、試験開始直後の急激な応力の緩和に試験機の送錘移動速度が追従できない場合は、設定ひずみ到達前に極短時間の荷重制御保持（送錘を停止した状態をいう）を行うことが有効である。なお、保持時間は最大 30 秒を目安とする。

(6) リラクセーション試験データの記録

重錘負荷完了後、リラクセーション試験開始までの時間、ひずみ及び応力を記録する。

荷重制御保持試験の場合は、保持時間、ひずみ及び応力を記録する。

リラクセーション試験開始後は、ひずみ、応力及び偏差の時間変化を全試験期間にわたり連続的に記録する。

オンラインデータ収集システムが備わっている場合のデータ（応力、ひずみ）のサンプリング時間は、0, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.006, 0.008, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1……(hr) とするのが望ましい。

(7) 試験の監視

定期的な監視を試験終了まで行う。なお、リラクセーション試験では、原則として試験中断による復帰操作は実施しない。

(8) 試験の終了

試験時間完了時を試験の終了とする。

(9) 試験片の保管

第 2.1 項引張試験と同様である。

2.3.6 試験結果の報告

リラクセーション試験データの報告事項を以下に示す。また、代表的なデータシート及びグラフを Appendix 2.3-5, 6 に記載した。

- (1) 素材（鋼種、ヒート No.）
- (2) 試験片の材質及び形状（試験片の履歴を含む）
- (3) 試験装置の概略仕様
- (4) 試験条件
 - ① 試験温度
 - ② 全ひずみ
 - ③ 昇温時間、均熱時間

- ④ 負荷速度
- ⑤ 負荷完了後リラクセーション測定開始までの時間
- ⑥ 荷重制御保持時間
- (5) 試験方法
- (6) 試験結果
 - ① 初期応力、残留応力
 - ② リラクセーション曲線またはこの曲線を正確に描くのに足るだけの十分な測定値、他
- (7) その他、試験中の異常の有無

2.3.7 試験結果のデータベース化

第2.1項引張試験と同様である。

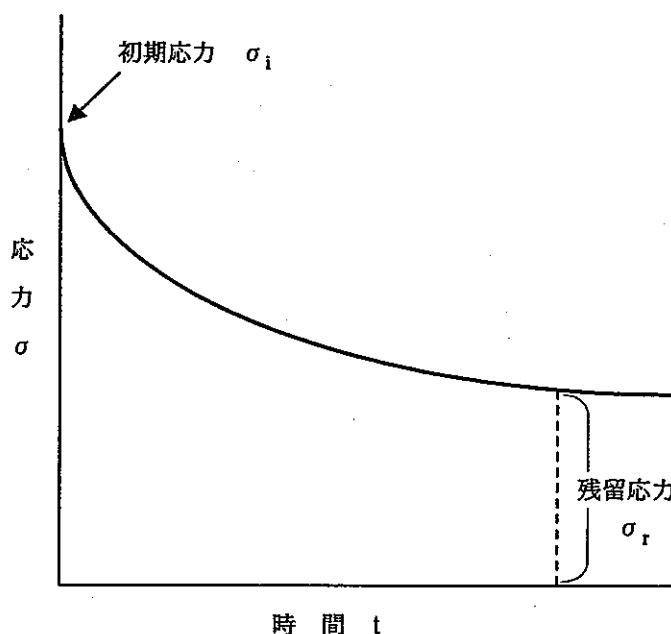
2.3.8 引用規格

- ① JIS B 0031-1994 日本工業規格 「製図一面の筋の図示方法」
- ② JIS B 0601-1994 日本工業規格 「表面粗さ一定義及び表示」
- ③ JIS C 1602-1995 日本工業規格 「熱電対」
- ④ JIS Z 2276-1975 日本工業規格 「金属材料の引張リラクセーション試験方法」

※ 発行年付きの引用規格は、その最新版を適用する。

表 2.3-1 リラクセーション試験に関する用語の説明

No.	用語	標準記号 (単位)	説明
1	リラクセーション (Relaxation)	—	ストレス・リラクセーション(応力緩和)のことであり、一定ひずみの条件下で試験片の応力が時間的に低下する現象
2	標点距離 (Gauge Length)	l_0 (mm)	伸び測定がなされる試験片の部分 (図 2.3-1 参照)
3	公称応力 (Nominal Stress)	σ (N/mm ²)	荷重Pを試験片の平行部の原断面積A ₀ で除した値 $\sigma = P / A_0$
4	初期応力(荷重) (Stress on Load)	σ_i (N/mm ²)	初期負荷時に負荷される最大応力 Initial Stressとも言う (付図 2.3-1 参照)
5	残留応力 (Residual Stress)	σ_r (N/mm ²)	試験中の任意の時間に、試験片に加えられている応力(付図 2.3-1 参照)
6	全ひずみ (Total Strain)	ε_t (%)	常温での標点距離に対する試験温度での伸びの比



付図 2.3-1 リラクセーション曲線の模式的説明

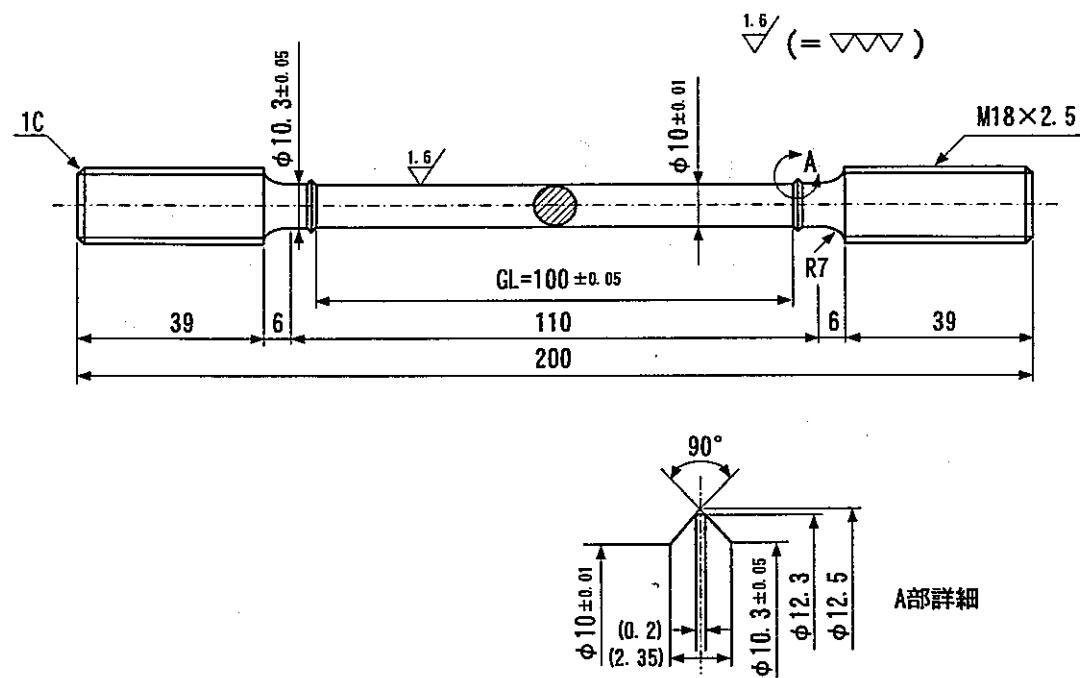


図2.3-1 リラクセーション試験片外観図

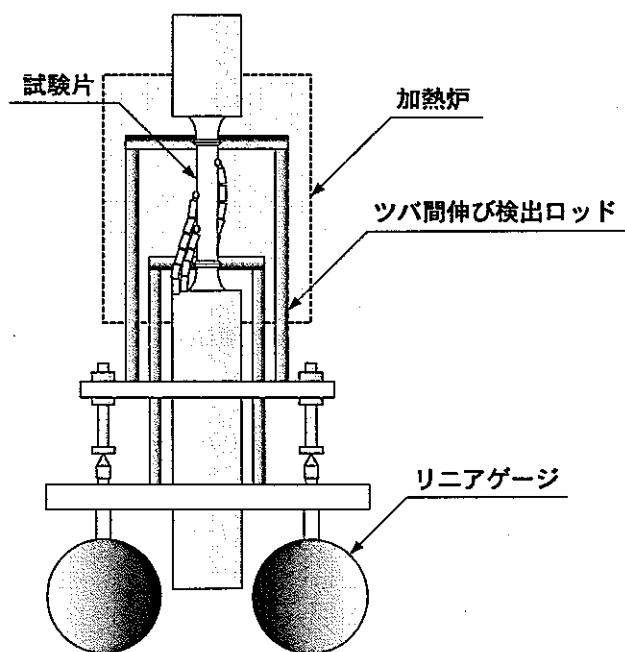


図2.3-2 アームショルダー型伸び計の取り付け図

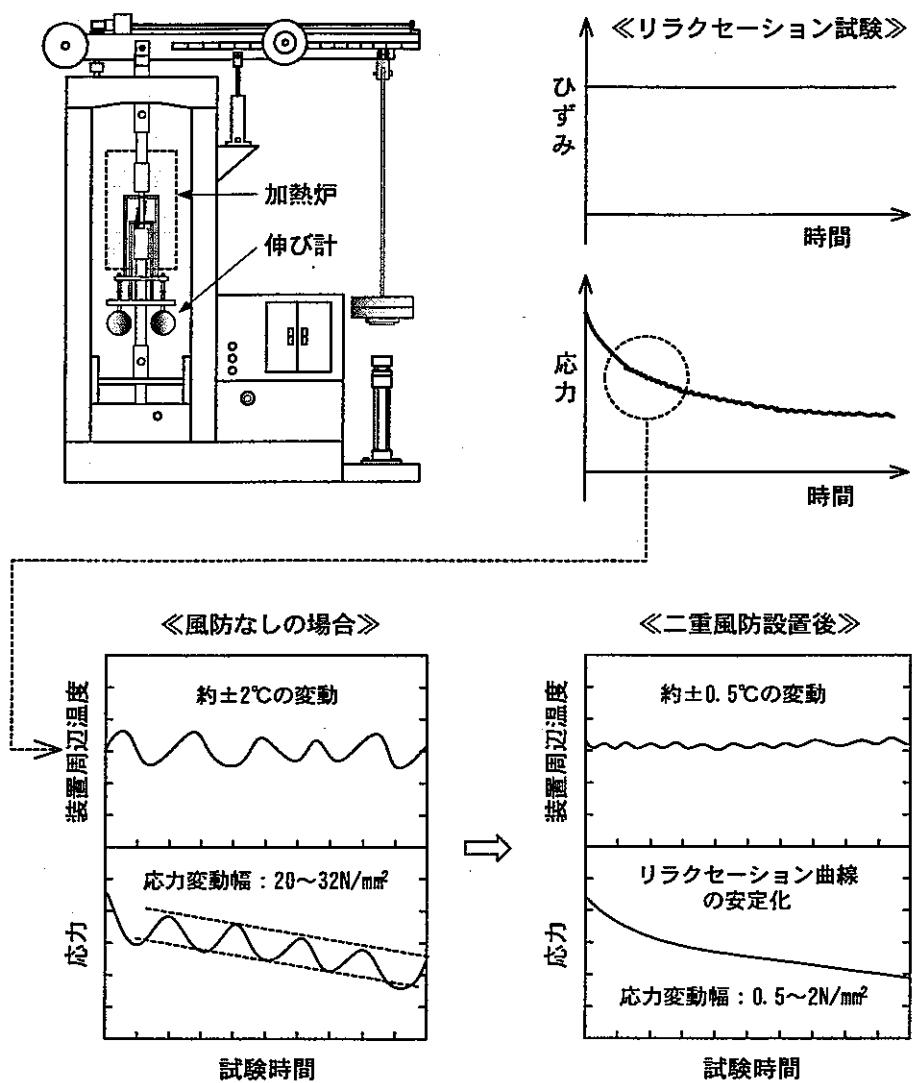


図2.3-3 二重風防による試験精度の向上例

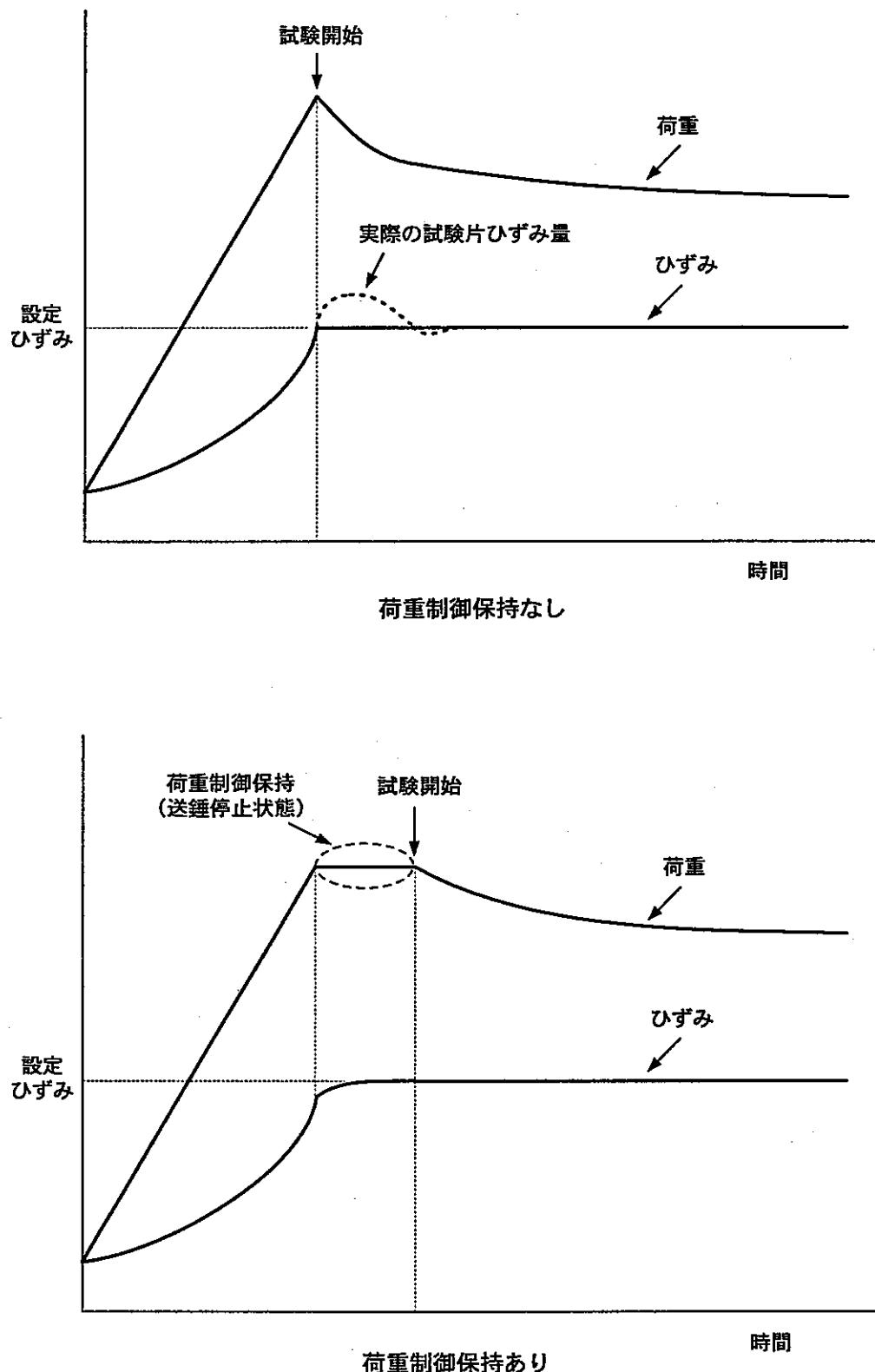


図2.3-4 リラクセーション挙動の比較

2.4 低サイクル疲労試験

2.4.1 適用範囲

本章の規定はF B R金属材料の大気中並びにナトリウム中での低サイクル疲労試験及びクリープ疲労試験に適用するものである。

2.4.2 用語の説明

本試験において用いられる用語の説明を表2.4-1に示す。

なお、単位の表示はJISに従い国際単位系(SI)を用いる。

2.4.3 試験片

本試験において使用する試験片は、JIS Z 2279を参考にする。

試験材料は、高速炉用構造材料の均一な金属組織を有する板、鍛造品、管及び棒材等並びに、これらの溶接金属や継手材料等を対象とする。

(1) 試験片形状

大気中疲労試験片の形状は、図2.4-1に示す中実丸棒型(平行部外径6φ、10φ)を標準とする。また、試験片にはひずみ集中を避けるために、平行部にひずみ検出用突起(ツバ)を設けない構造とする。なお、図2.4-1に示す試験片の形状は、つかみ部の構造によりボタンタイプ、ネジタイプになっている。

ナトリウム中の試験片は図2.4-2に示すように、中実丸棒型(平行部外径10φ)を標準とし、ナトリウムの流れる配管と流速を得るためのスペーサ、試験片の伸び・縮みを吸収させるペローズを溶接した構造が望ましい。なお、ナトリウム環境効果を評価するために、試験片単体(ペローズ、スペーサ等を付けない状態)で大気中試験に供することができる。

なお、標準試験片以外の形状、寸法のものを使用する場合は、別途協議の上決定する。

(2) 採取位置

第2.1項引張試験と同様である。

(3) 加工方法

第2.1項引張試験と同様である。

(4) 特殊試験片の製作

試験片の素材が小さく試験片寸法がとれない場合は、図2.4-3に示したように平行部の部分と、試験片つかみ部として別材料(同材質)を溶接して製作する。その場合は平行部に熱ひずみ等の影響を与えない溶接方法[E.B溶接(エレクトロビーム)またはTIG溶接等]を採用し、溶接部は平行部から極力離れた位置にする。また、溶接金属や継手試験片に関しては、第2.1項引張試験(特殊試験片の製作)と同様とすることが望ましい。

2.4.4 試験装置

本試験に使用する試験装置は JIS Z 2279 に適合するものでなければならない。

引張圧縮疲労試験装置は、閉ループ電気油圧サーボ制御方式またはバックラッシュを少なくするよう設計された電気サーボモータによる偏心カム式、ポールネジ方式等とし、荷重及びひずみが任意に制御できる構造にする。

一般的に広く採用されている前者の電気油圧サーボ制御試験装置は主として高温低サイクル疲労並びに比較的短時間のクリープ疲労試験に用いる。この試験装置は応答性が良く、大荷重、高速試験が可能である。また、電気サーボモータ式の疲労試験装置は、長時間にわたる低ひずみ速度疲労試験や長時間クリープ疲労試験に用いる。

これらの疲労試験装置は、負荷装置、ひずみ測定装置、加熱装置、荷重測定装置、計測制御装置等から構成される。当 Gr に設置されている疲労試験装置の仕様を Appendix2.4-1 に、構成図を Appendix2.4-2, 3 に示す。

(1) 負荷装置

電気油圧サーボ制御方式の場合、負荷装置（アクチュエータ）は作動油流量を制御するサーボ弁、機械振動する加振機、加振機ピストンの動作を検出する変位検出器等により構成される。試験片の保護は、油圧が OFF になると、制御が切り替わる（ひずみ→荷重制御）ことにより行っている。

電気サーボモータの場合、偏心カム式とポールネジ式があり、どちらもサーボモータを制御することにより偏心カム、ポールネジ等を介して負荷する構造である。除荷機能としては、偏心カム式の場合はクラッチが解除される機能を、ポールネジ式の場合は油圧ロックが解除される機能を有する。

(2) 試験片つかみ部（チャック）

つかみ部は試験片の座屈を防止するため、試験片の軸芯を保証する形状とする。また、装着時に過大なねじりモーメントを試験片に負荷しない構造とする。つかみ部は、ゆるみや焼き付きがなく引張圧縮の荷重負荷ができる構造とする。

Appendix2.4-4, 5 に試験片つかみ部の外観図を示す。

(3) ひずみ測定装置

ひずみ測定装置は、各レンジのフルスケールに対して±1.0%以内の静的精度を有するものとする。

また、これ以降の内容は、軸ひずみ測定装置について記述したものである。

① 押し当て型ひずみ計

大気中疲労試験に使用するひずみ計は、試験片の標点部に直接石英棒（またはセラミックス棒等）を押し当て、ひずみを検出する押し当て型（LVDT 方式またはひずみゲージ方式）が望ましい。ひずみ計は、昇温時及び地震時の振動等に対して押し当て部が滑りにくい構造にする必要がある。押し当て部の滑り防止対策として以下の方法がある。なお、詳細については図 2.4-4 を参照されたい。

- (a) ひずみ計押し当て部形状を2点接触のVノッチにする。
- (b) 抱き込み用石英棒を併用する。
- (c) 抱き込み用金具と止めピンを併用する。また、吊りスプリングによって地震時等による振動を吸収する構造とする。

② アームショルダー型ひずみ計

ナトリウム中疲労試験に使用するひずみ計は、図2.4-5に示したベローズ付き疲労試験片の外側に設けた変位検出用突起（ツバ）間の変位を測定できるアームショルダー型（LVDT方式）が望ましい。

Appendix2.4-6, 7, 8に各種ひずみ計の外観図を示す。

(4) 加熱装置

加熱装置は試験片を試験目的に応じた試験温度まで高温加熱するためのものであり、その方式には電気ヒータ加熱炉方式と高周波誘導加熱方式が望ましい。温度検出用熱電対は、JIS C 1602によるものとし、直径0.3φのR熱電対（JIS階級クラス2）を標準とする。温度制御はPID調節式とする。

(5) 荷重測定装置（ロードセル）

荷重測定装置は、弾性材料にストレインゲージを貼り、せん断ひずみを検出するロードセル方式とする。検出器は試験片の上部、または下部ロッドに取付けるものとし、許容温度範囲内に冷却する必要がある。

また、静的荷重測定精度は±1.0%以内とする。

(6) 記録装置

応力、ひずみ及び温度の計測には、レコーダやオンラインデータ収集システムを用いる。

① レコーダ

X-Yレコーダにより、応力とひずみのヒステリシスループを、X-Tレコーダ及び温度記録計により応力、ひずみ、温度等の時間変化を記録する。

② オンラインデータ収集システム

第2.3項リラクセーション試験と同様である。

Appendix2.4-9にオンラインデータ収集監視システムの接続概略図を示す。

(7) 試験装置設備環境

試験装置及び各種検出器はデータの信頼性、品質向上を得る目的で試験期間中、常に一定の環境に維持することが必要である。そのための方法として、試験室内の温度変動を±2°C以内に調整し、かつ、試験装置本体を二重の風防カバーで覆う構造として雰囲気の温度変動を±0.5°C以内に維持することが望ましい。これらは図2.4-6に示すように、空調設備による室内の温度変動及び風によ

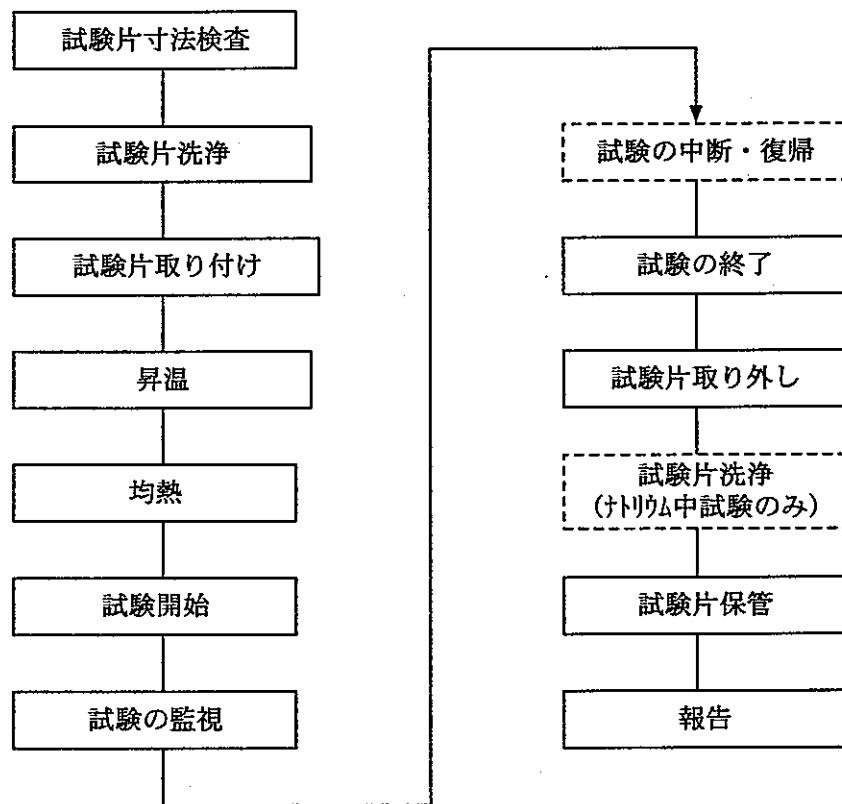
って起こるひずみ計の微振動による荷重の変動を防止し、疲労試験時におけるピーク応力及びクリープ疲労試験時の応力緩和挙動データを高精度で取得するためである。

また、図 2.4-7、8 に示すように、冷却水（循環式）は管理システム及び水フィルタユニットにより、冷却水成分の調整、小石、泥等の除去を行い試験装置内冷却水路の閉塞を防止することによって、長期にわたり安定した試験が実施できる。

2.4.5 試験方法

試験温度、負荷方法などについては JIS Z 2279 に従うものとする。

低サイクル疲労試験及びクリープ疲労試験の標準的な試験手順を以下に示す。



(1) 試験片寸法検査

試験片納入時の検査成績書を確認する。

なお、図 2.4-9 に試験片の寸法測定箇所を示す。

(2) 試験片洗浄

第 2.1 項引張試験と同様である。

(3) 試験片取り付け方法

① 軸芯精度の確認

上下ロッド間の軸芯及び水平度は、年1回以上の頻度でそれぞれ0.05mm, 0.01mm以内であることを確認するべきである。確認方法は図2.4-10に示すように油圧サーボ式の場合、試験装置のアクチュエータ側のロッド（下部ロッド）を一回転させ、90°毎にダイヤルゲージにてその偏心量を測定する。電気サーボモータ式の場合、上下部ロッドとも回転しない構造のため、上下部ロッド間に回転可能な軸芯測定治具を取付けて軸芯を測定する。また、必要に応じて曲げ応力を測定する。曲げ応力測定は、油圧サーボ式、電気サーボモータ式とも図2.4-11に示すように、試験片にひずみゲージを90°方向に4枚を接着し、弾性範囲内の荷重を試験片に与えた時の曲げ偏心量を測定し、曲げひずみ成分を図中の式により換算して、5%以内であることを確認する。

② 試験片取り付け

試験片の取り付けに際しては、過大なひずみ負荷を防止するため、取り付けに必要な最小限の負荷荷重以外の負荷が試験片にかかるないようにする。なお、つかみ部分は試験片の装着時に過大なねじりモーメントを試験片に負荷しない構造を採用する。

③ ひずみ計取り付け方法

押し当て型ひずみ計を取り付ける場合は、試験中に外れたり、ずれたりしないようするため、上下石英棒の押し当て力が均一になるよう調整する。また、昇温前にひずみ計を取り付ける場合は、熱膨張量を計算し、試験温度に達した時が標点距離になるようにひずみ計を調整する。

均熱に入ってからひずみ計を取り付ける場合は、予め、上下石英棒先端間が標点距離と同じになるように調整するとともに、試験部全体の熱膨張を考慮して、ひずみ計が試験片平行部の中心に位置するよう調整しておく（図2.4-12参照）。

(4) 加熱方法

① 大気中疲労試験

熱電対の固定は、点付け溶接法と耐熱紐による縛り付け法を併用する。点付け溶接法は、熱電対が安定して固定され、温度検出誤差の少ない方法であるが、試験片平行部ではき裂発生の起点になりやすい。一方、縛り付け法は固定性、検出精度では点付け溶接法に劣るが、き裂発生の起点になりにくい。このため、以下の要領で試験片平行部の温度分布をJIS Z 2279の規定値である±5℃以内になるよう調整を行う。なお、高周波誘導加熱の場合、熱電対の先端（温度検出部）の形状は、球状よりも円盤状の方が温度検出誤差を少なくできるため、厚さ約0.3mm、直径約1mm程度にする（図2.4-13参照）。また、原則として大気中疲労試験では、試験毎に熱電対の先端を作り換えて使用する。

(a) 本試験前の温度分布測定（図2.4-14参照）

予備試験片（本試験片と同形状、同材質のもの）を用いて、制御用熱電対1点を試験片のR部に点付け溶接する。また、温度分布モニター用熱電対を試験片平行部の上、中、下の計3点取付

ける。試験片を電気炉または高周波誘導加熱にて加熱し、試験片平行部の熱電対 3 点の温度を設定に対して±5℃以内になるよう調整（電気炉は上、中、下ヒータの出力バランスを調整、高周波誘導加熱は電源を遮断しワークコイル形状を調整）する。参考として、Appendix2.4-10 に高周波誘導加熱方式のワークコイルの製作及び調整方法を示す。なお、このときの全体的な温度制御は、R 部に点付け溶接した制御用熱電対にて行う。（注：制御用熱電対の温度は設定に対して±5℃以上でもよい。）

(b) 本試験時の温度調整（図 2.4-14 参照）

本試験時は、制御用熱電対 1 点を試験片 R 部に点付け溶接し、モニター用熱電対 1 点を平行部中央に耐熱紐にて縛り付け（図 2.4-15 参照）、モニター用熱電対の温度が設定温度になるように出力調整する。試験片平行部の温度分布は、高周波誘導加熱では上記(a)項で調整の済んだワークコイルを使用することで、電気炉では上記(a)項と同じ上、中、下ヒータの出力バランスに調整することで、それぞれの温度分布を補償する。なお、制御用熱電対の温度は設定に対して±5℃以上でもよい。

(c) 均熱保持

昇温後の均熱時間は、ひずみ計の出力値が安定するまでとする。

② ナトリウム中疲労試験

ナトリウム中疲労試験の温度制御は、図 2.4-16 に示すようにペローズ付き疲労試験片出入口温度をウェル型 K 熱電対で測定し、ナトリウムループの加熱器により流体ナトリウムの温度を制御する。その場合、試験装置の加熱炉は、ペローズ試験片に流れているナトリウムの入口と出口の温度差が±5℃以上にならないように予熱炉として使用する。昇温後の均熱時間は、ひずみ計の出力値が安定するまでとする。

(5) 試験負荷方法

試験片取り付けから試験開始直前までは、荷重制御により無負荷の状態を維持する。各記録装置を準備し、試験装置の条件設定後すみやかに負荷装置を作動させて試験を開始する。試験中、制御波形と出力波形の誤差は全制御量の±3%以内とする。

(6) 疲労データの記録

① ヒステリシスループの記録

オンラインデータ収集システムまたは X-Y レコーダ等により、応力とひずみのヒステリシスループを記録する。初期の 10 サイクルを連続測定記録し、その後は対数的に増加させて記録する。その回数としては、12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 180, 200 ……が望ましい。また、クリープ疲労試験の場合、保持中の応力、ひずみについても対数的（減少方向）に記録する。その測定時間は、 $0, 2.78 \times 10^{-5}, 5.56 \times 10^{-5}, 8.33 \times 10^{-5}, 1.39 \times 10^{-4}, 2.78 \times 10^{-4}, 5.56 \times 10^{-4}, 8.33 \times 10^{-4}, 1.39 \times 10^{-3} \dots \dots$ (hr) が望ましい。

(7) 応力、ひずみ及び温度の時間変化の記録

X-Yレコーダ等により、応力、ひずみ及び温度を連続的に記録する。

(8) 試験の監視

① 試験開始直後の数10サイクル（試験の安定時）までは、試験片の座屈の有無やヒステリシスループの異常、ひずみ計の滑り等の有無を確認し、異常のないことを確認する。その後は定期的な監視を試験終了まで行う。

② ナトリウム中試験の場合、疲労試験データの記録の他にナトリウムループの主要部温度、流量等の試験条件を記録し、常時ループ運転状態を監視・記録する。

(9) 試験の中止・復帰方法

試験中何らかの異常により試験が中断した場合は、その原因を除去し、試験片の温度及びひずみ出力等を中断前の状態に戻した後、すみやかに再復帰する。ただし、中断によるひずみ計の滑り等が原因で、制御（ひずみ）振幅のズレに伴う荷重の増減が生じた場合や試験片の変形（座屈）等が確認された場合は試験を中止する。

なお、このような中断の要因は、試験の履歴としてデータと共に報告する。

(10) 試験の終了

試験片の破損繰り返し数は、JIS Z 2279に従い図2.4-17に示す方法で求める。このために試験では余分に繰り返しを与えた後に停止させることとし、その後破損回数を決定する。

(11) 試験片の保管

試験終了後、試験片をペーパータオル等で包装し、試験片番号、試験条件等を明記したうえで所定のデシケータに保管する。なお、ナトリウム中疲労試験片については、保管前に付着ナトリウムを取り除く。試験片にベローズ等が付いた状態でエチルアルコールによる粗洗浄を行い、その後ベローズ等を取り外して、アセトン、エチルアルコールの順にそれぞれ10分間の洗浄（超音波洗浄器使用）を実施する。

(12) 破損繰り返し数の決定

試験片の破損繰り返し数の求め方は、JIS Z 2279に準拠するものとする。

① 硬化材

図2.4-17に示すように、引張ピーク応力の最大の値または引張ピーク応力の最大値が定常となつた時の値の25%低下するまでの繰返し数を硬化材の破損繰返し数とする。

② 軟化材

図2.4-17に示すように、引張ピーク応力が低下し続け、応力の定常状態が明確に認められない

場合は、破損前に示す σ_{max} の急激な低下部を除く寿命中間以降の σ_{max} 変化傾向を直線 ($y=ax+b$) で外挿し、その外挿線から 25% 低下した時点の繰返し数を軟化材の破損繰返し数とする。

(13) 破損位置の決定

図 2.4-18 に示すように母材及び溶接金属試験片の場合は、標点間内を 4 区間に分け、中央 2 区間を A、その外側各 1 区間を B、標点間外を C、ひずみ計押し当て部を D、その他熱電対取り付け部とする。

溶接及び異材継手試験片の場合は、第 2.1 項の引張試験と同様である。

2.4.6 試験結果の報告

疲労試験データの報告事項を以下に示す。また、その代表的なデータシート及びグラフを Appendix 2.4-11~14 に記載した。また、ナトリウム中試験の場合、Appendix 2.4-15 に示す方法でひずみ範囲を算出した後、試験結果をまとめる。

- (1) 素材（鋼種、ヒート No.）
- (2) 試験片の材質及び形状（試験片の履歴を含む）
- (3) 試験装置の概略仕様
- (4) 試験条件
 - ① 試験温度
 - ② 試験制御
 - ③ 全ひずみ
 - ④ ひずみ速度
 - ⑤ 保持時間（クリープ疲労試験の場合）
- (5) 試験方法
- (6) 試験結果
 - ① 破損繰り返し数
 - ② 疲労寿命の 1/2、またはその近傍の値
(全ひずみ範囲、非弾性ひずみ範囲、応力範囲)
 - ③ 初期、定期、1/2 寿命時のヒステリシスループ
 - ④ 試験期間中の応力、ひずみの連続変化
 - ⑤ 破損位置、他
- (7) その他、試験中の異常の有無

2.4.7 試験結果のデータベース化

第 2.1 項引張試験の項と同様である。

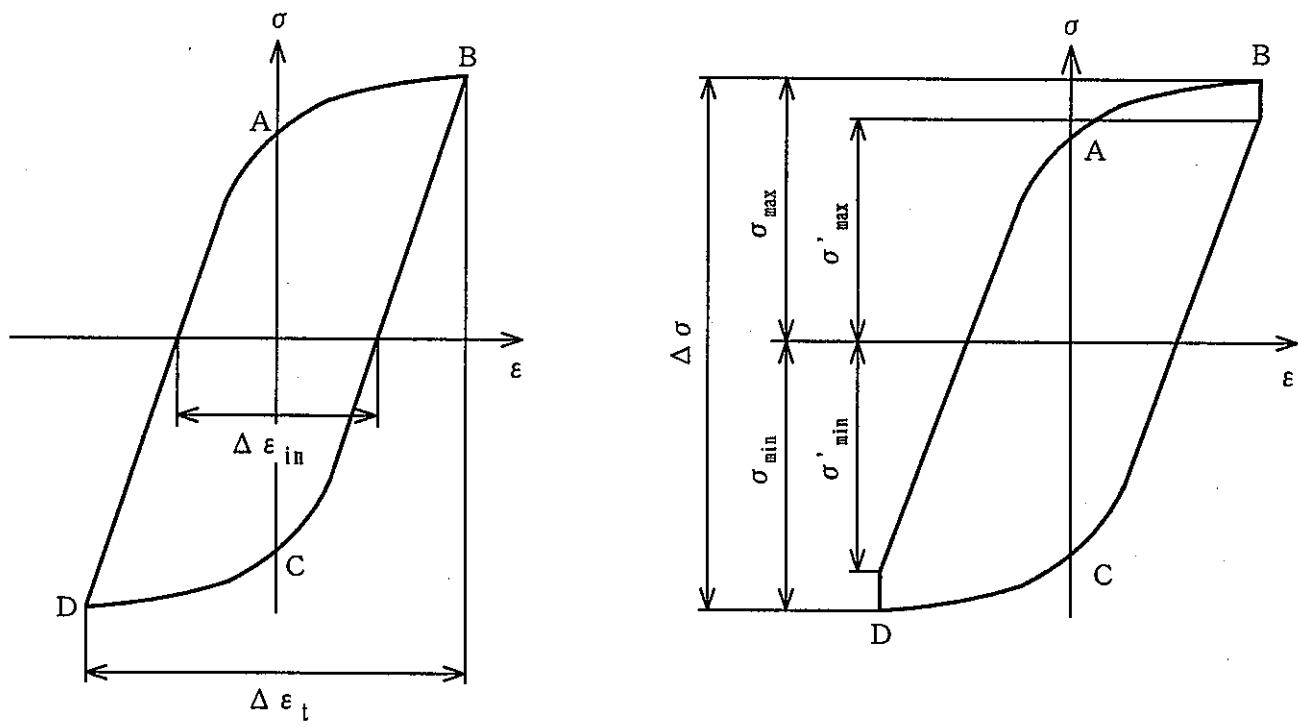
2.4.8 引用規格

- ① JIS B 0031-1994 日本工業規格 「製図一面の肌の図示方法」
- ② JIS B 0601-1994 日本工業規格 「表面粗さ—定義及び表示」
- ③ JIS C 1602-1995 日本工業規格 「熱電対」
- ④ JIS Z 2279-1992 日本工業規格 「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」

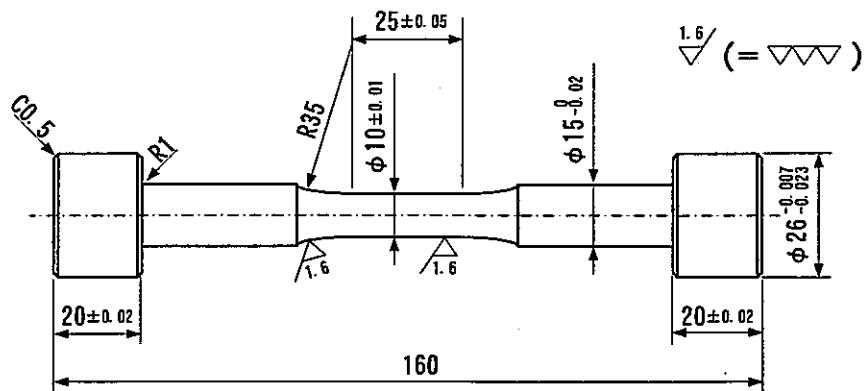
※ 発行年付きの引用規格は、その最新版を適用する。

表 2.4-1 低サイクル疲労試験に関する用語の説明

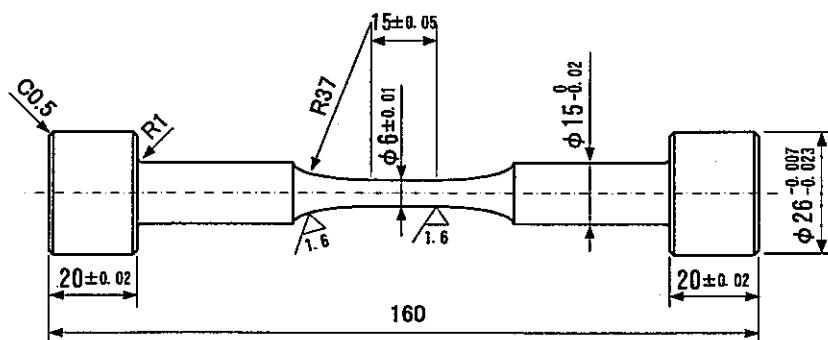
No.	用語	標準記号	説明
1	サイクル (Cycle)	—	ひずみ零の状態から、最大及び最小のひずみ点を経て、再びひずみが零となる状態に至るまで（付図 2.4-1 の A→B→C→D→A）。
2	繰り返し数 (Number of Cycles)	N (cycles)	疲労及びクリープ疲労試験中のひずみの繰り返し回数
3	ヒステリシスループ (Hysteresis Loop)	—	疲労及びクリープ疲労試験中の応力とひずみの関係を表すループ（付図 2.4-1 参照）。
4	ひずみ速度 (Strain Rate)	$\dot{\varepsilon}_t$ (%/sec)	全ひずみ範囲を 1/2 周期の所用時間で除した値
5	周波数 (Frequency)	f (Hz, cpm)	単位時間あたりの繰り返し数
6	ひずみ保持時間 (Strain Hold Time)	t_h (hr)	台形波形のひずみ制御試験における、1 サイクル中のひずみ一定となる時間。
7	全ひずみ範囲 (Total Strain Range)	$\Delta \varepsilon_t$ (%)	試験片標点間の全変形量を標点間距離で除した値に 100 をかけたもの。
8	非弾性ひずみ範囲 (Inelastic Strain Range)	$\Delta \varepsilon_{in}$ (%)	1/2N _f 近傍における応力 - ひずみヒステリシスループにおいて、応力が零の時のひずみの範囲（付図 2.4-1 参照）。
9	弾性ひずみ範囲 (Elastic Strain Range)	$\Delta \varepsilon_e$ (%)	（全ひずみ範囲） - （非弾性ひずみ範囲）
10	破損繰り返し数 (Number of Cycles to Failure)	N _f (cycles)	第 2.4.5(12) 項 破損繰り返し数の決定参照
11	破損時間 (Time to Failure)	t _f (hr)	負荷開始から破損繰り返し数に至るまでの時間
12	最大、最小応力 (Max., Min. Stress)	σ_{max} σ_{min} (N/mm ²)	各サイクルにおける最大（引張側）及び最小（圧縮側）応力の絶対値（付図 2.4-1 参照）。
13	緩和後の最大、最小応力 (Max., Min. Stress after Relaxation)	σ'_{max} σ'_{min} (N/mm ²)	ひずみ保持後の最大（引張側）及び最小（圧縮側）応力の絶対値（付図 2.4-1 参照）。
14	応力 (Stress)	σ (N/mm ²)	負荷荷重を試験前の試験片断面積で除した値
15	応力範囲 (Stress Range)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)	$\sigma_{max} + \sigma_{min}$
16	初期応力ひずみ線図 (Initial Stress Strain Curve)	—	負荷開始から最初に最大のひずみ点もしくは最小のひずみ点に達するまでの応力ひずみ曲線（Monotonic Curve）。



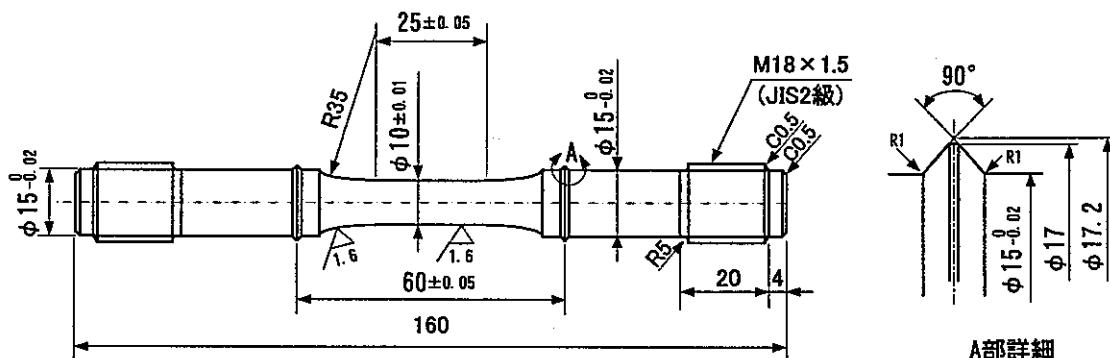
付図2.4-1 応力ひずみ波形図の模式的説明



10φ、ボタンタイプ

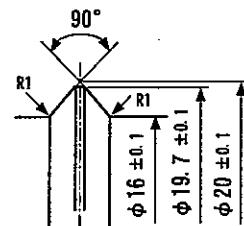
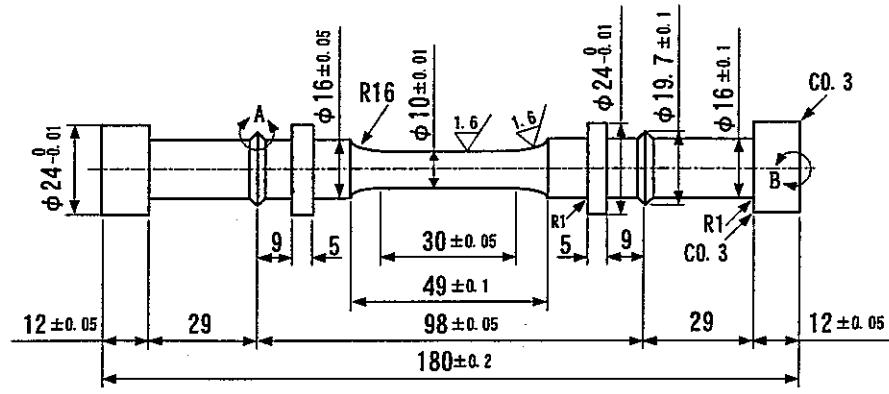


6φ、ボタンタイプ

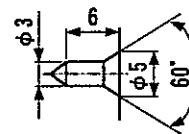


10φ、ネジタイプ

図2.4-1 大気中疲労試験片外観図

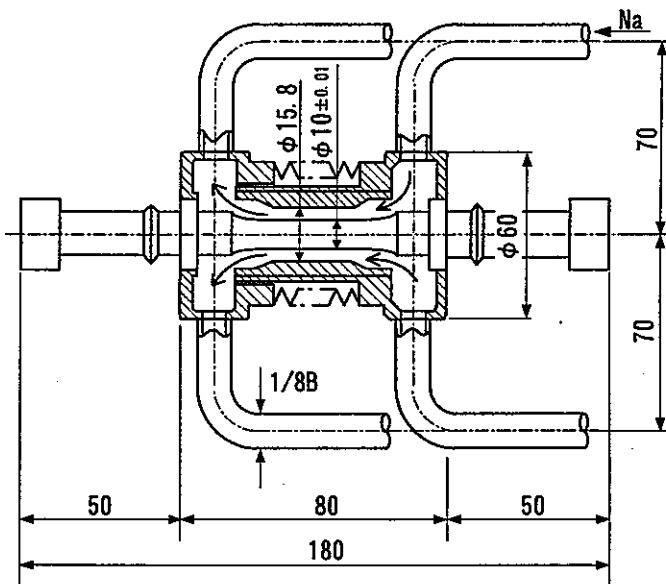


A部詳細



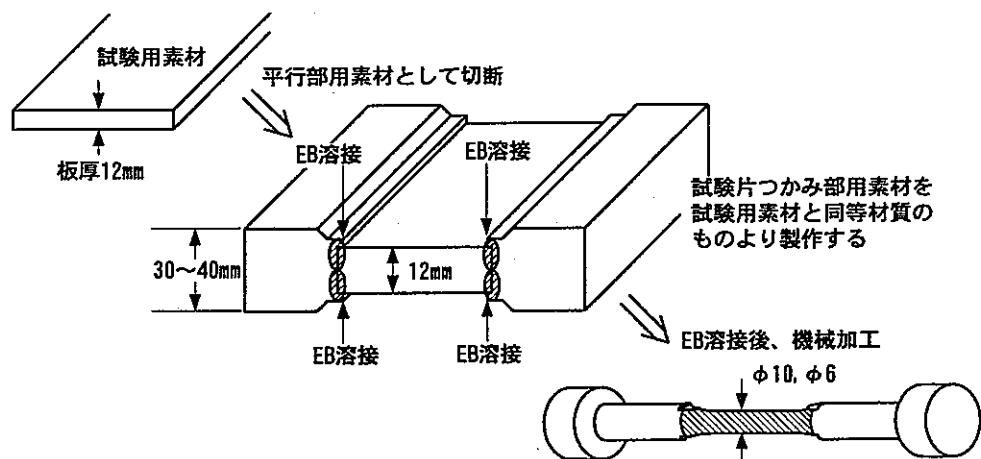
B部詳細

試験片詳細



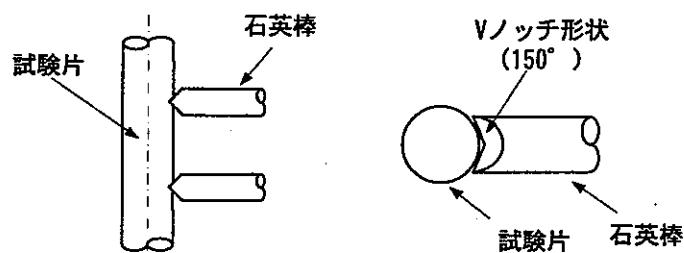
ペローズを付けた状態

図2.4-2 ナトリウム中疲労試験片外観図

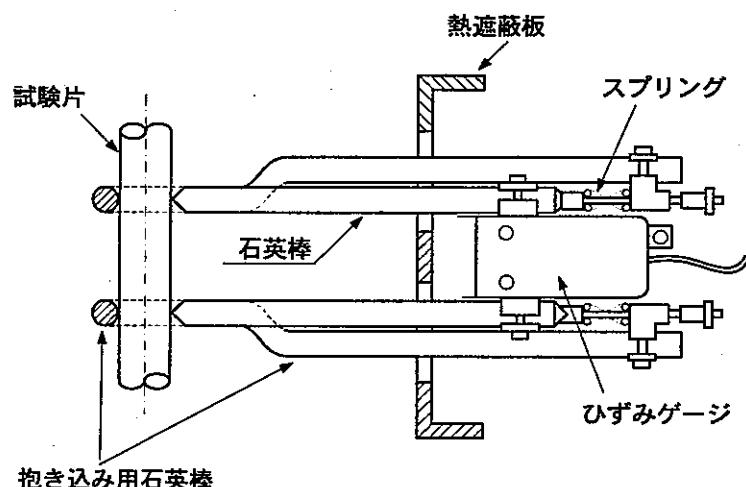


・薄肉材より疲労試験片を採取する場合の試験片製作例

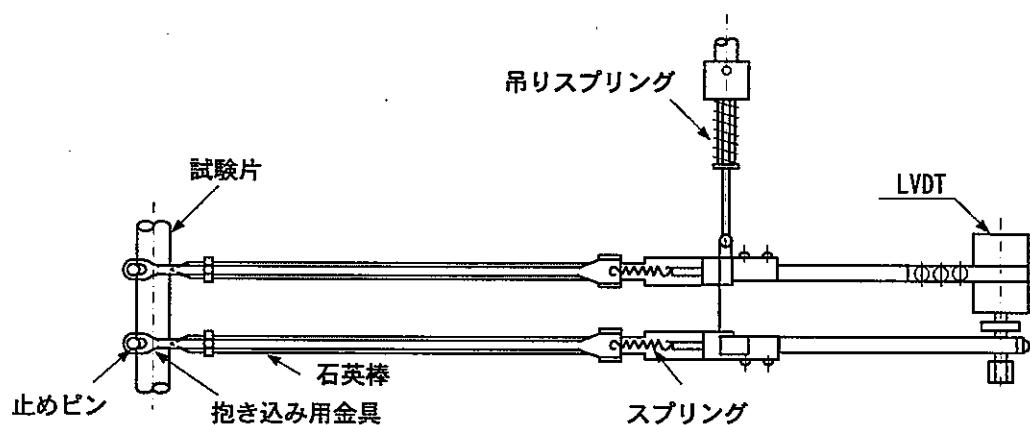
図 2.4-3 特殊疲労試験片の製作例



ひずみ計押し当て部形状の例



試験片抱き込み用石英棒の使用例



試験片抱き込み用金具及び吊りスプリング等の使用例

図2.4-4 ひずみ計押し当て部の滑り防止対策

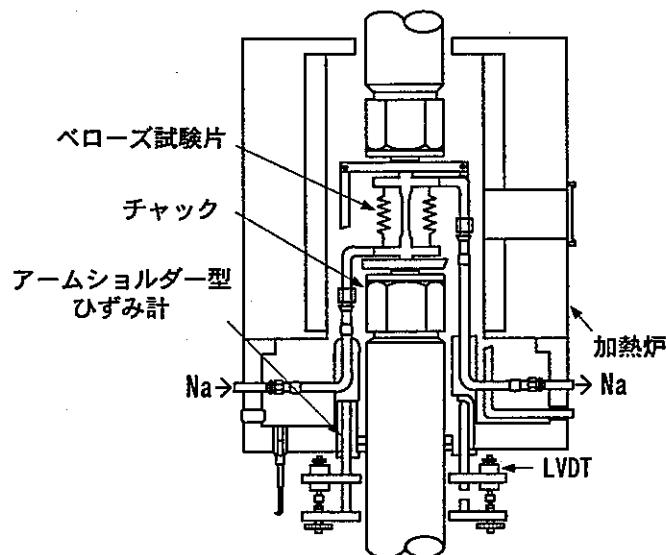


図2.4-5 アームショルダー型ひずみ計取り付け図

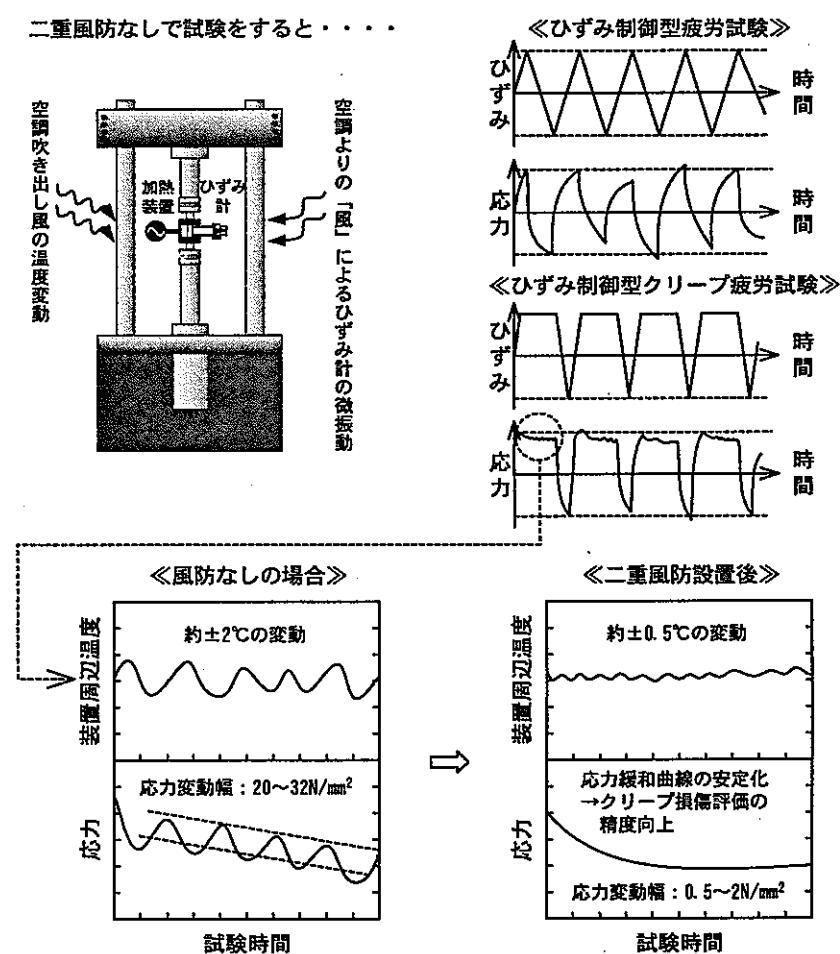


図2.4-6 二重風防による試験精度の向上例

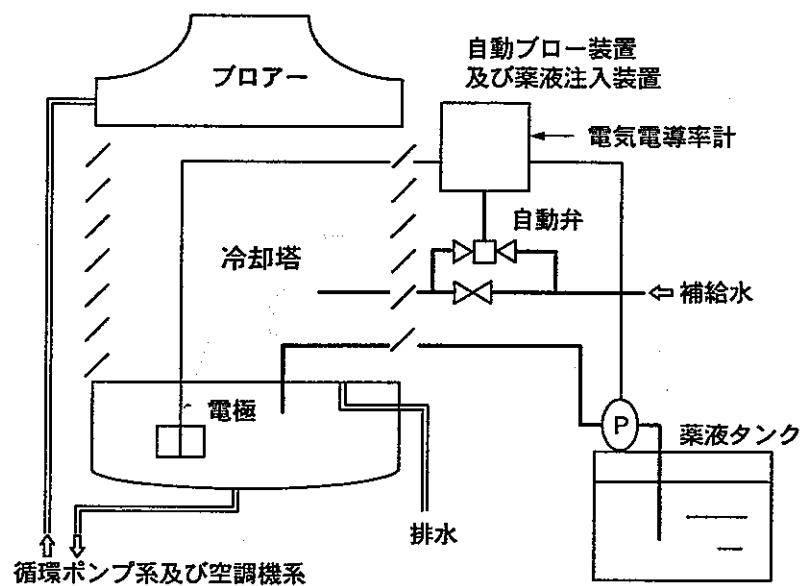


図2.4-7 冷却水管理システム

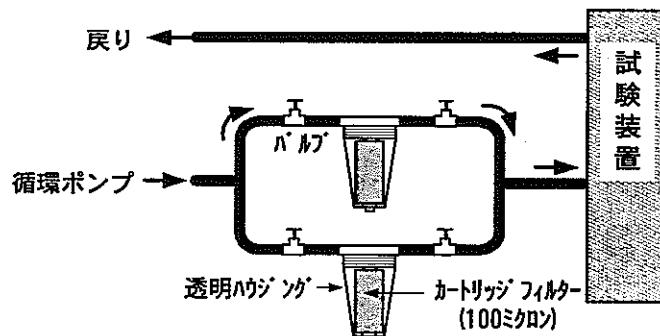
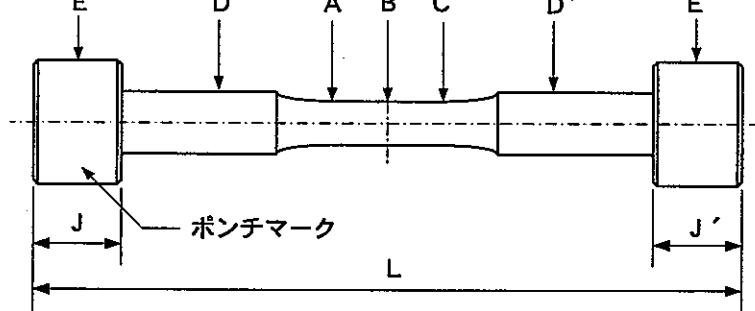


図2.4-8 水フィルターユニット



A, B, C, D, D', E, E' は直交2方向測定のこと。
J, J', L は軸対称となる2つの位置について測定のこと。

図2.4-9 疲労試験片寸法測定箇所

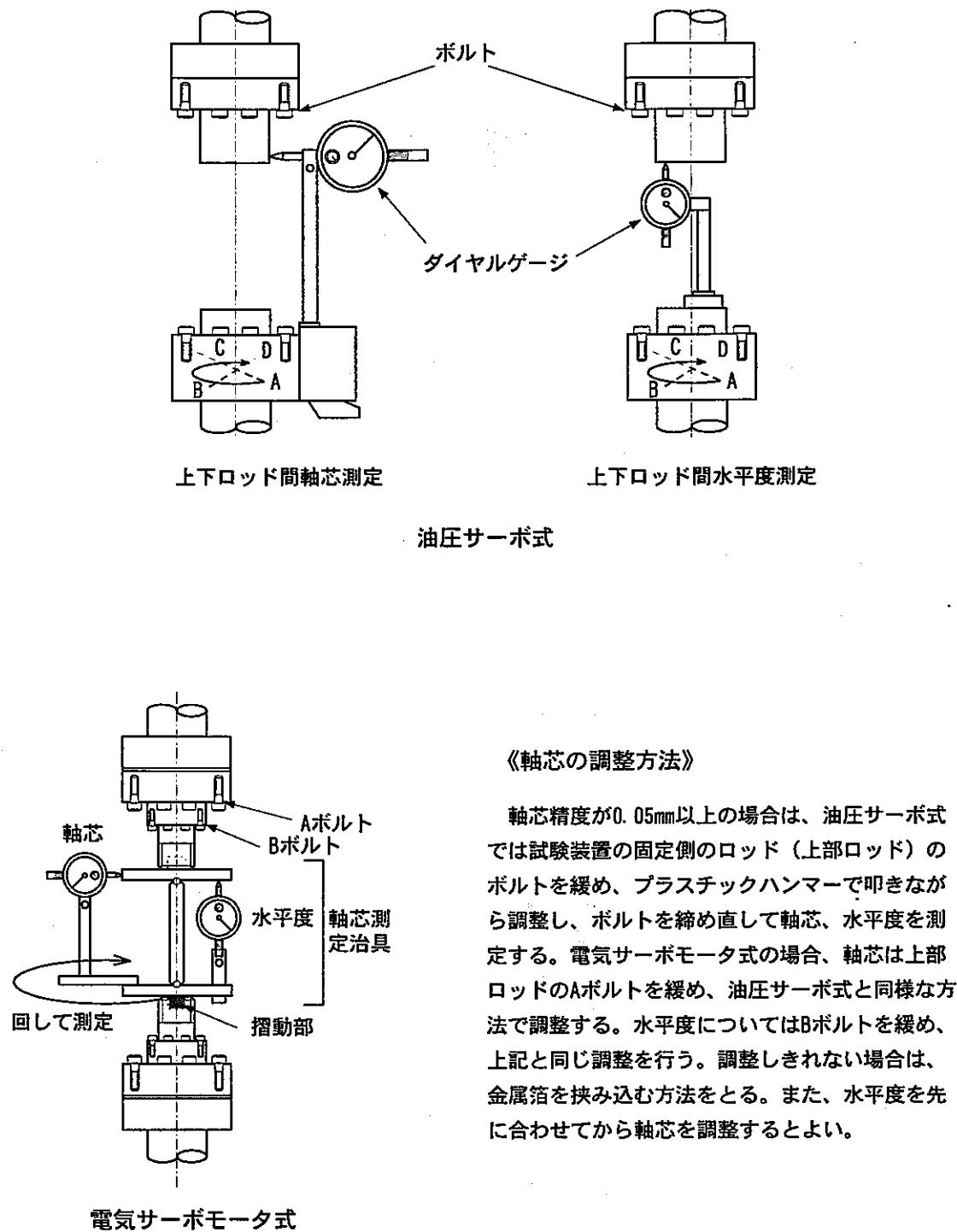
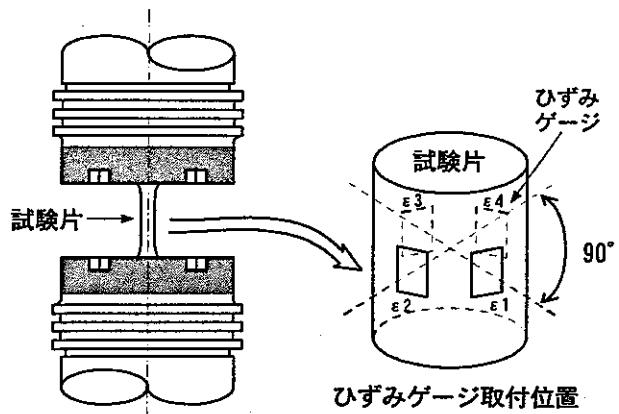
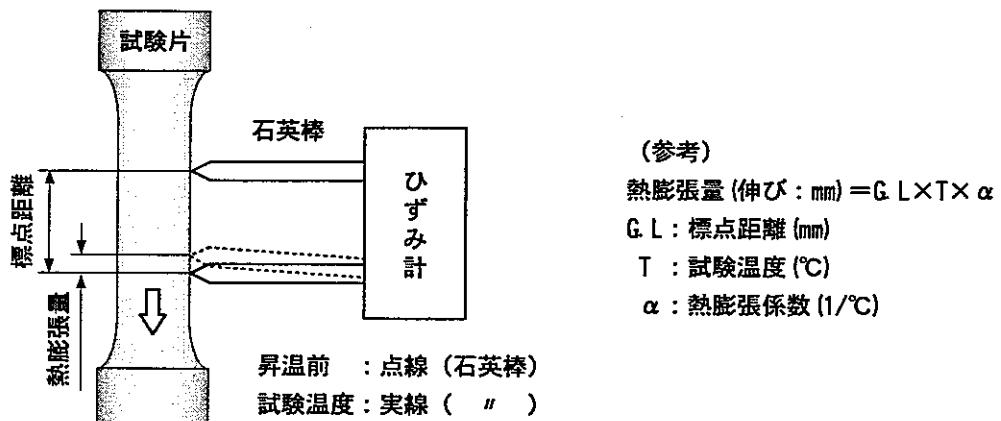


図2.4-10 軸芯精度計測方法

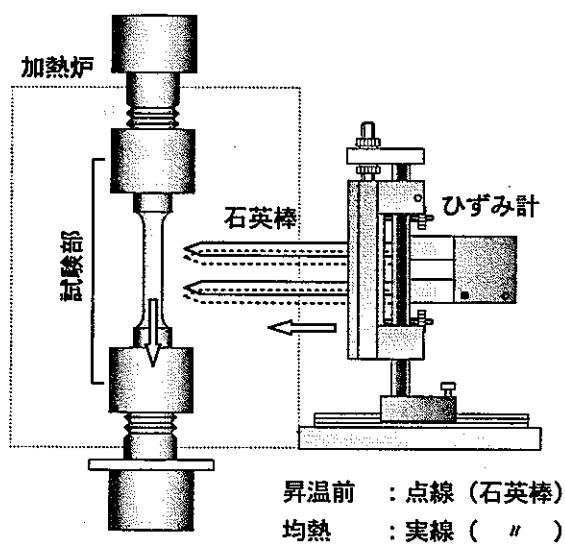


$$B (\%) = \frac{2 \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2}}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4} \times 100$$

図2.4-11 試験片曲げひずみ成分計測方法



昇温前に取り付ける場合



均熱に入ってから取り付ける場合

図2.4-12 ひずみ計取り付け方法

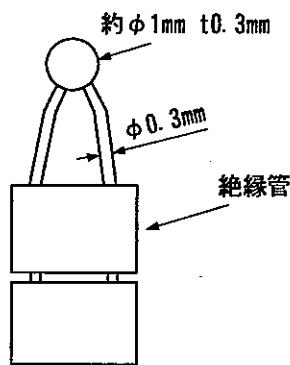


図2.4-13 热電対先端部の形状

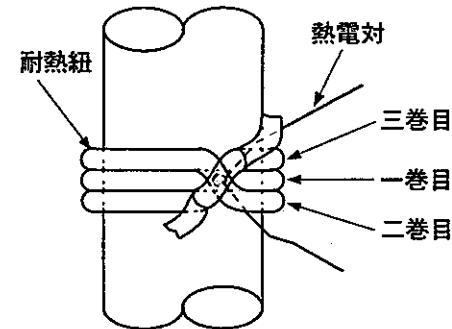
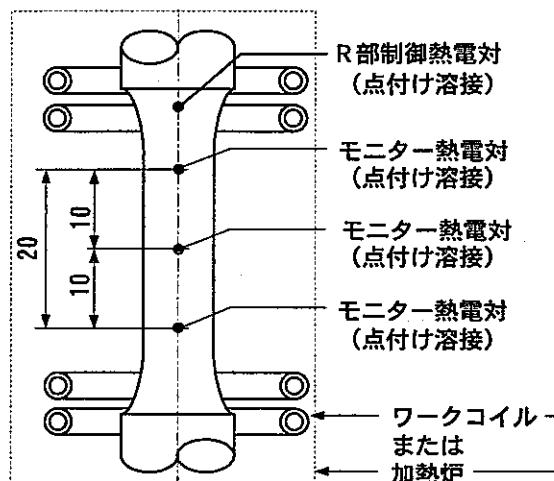
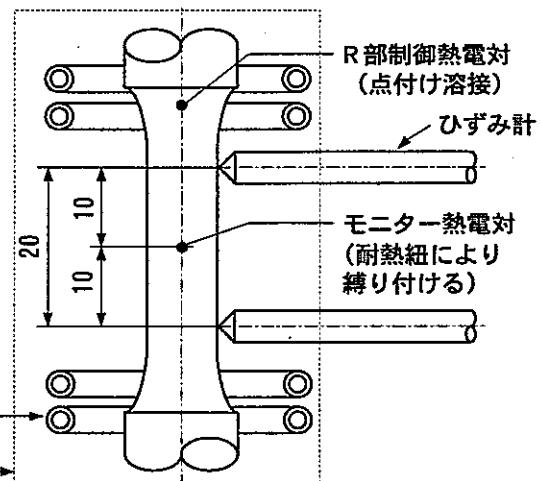


図2.4-15 热電対缚り付け方法



本試験前の温度分布の測定方法



本試験中の温度制御方法

図2.4-14 温度制御の方法

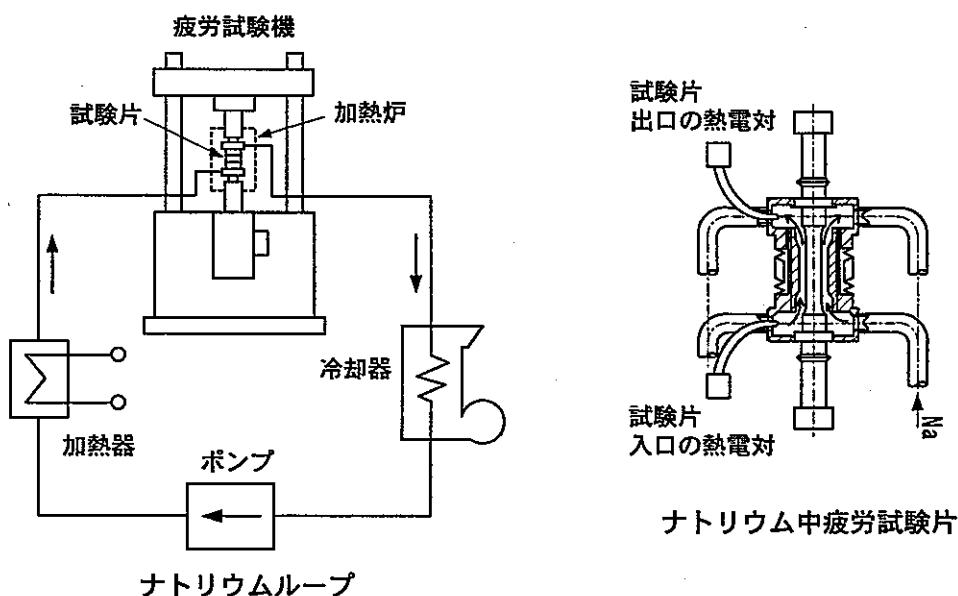
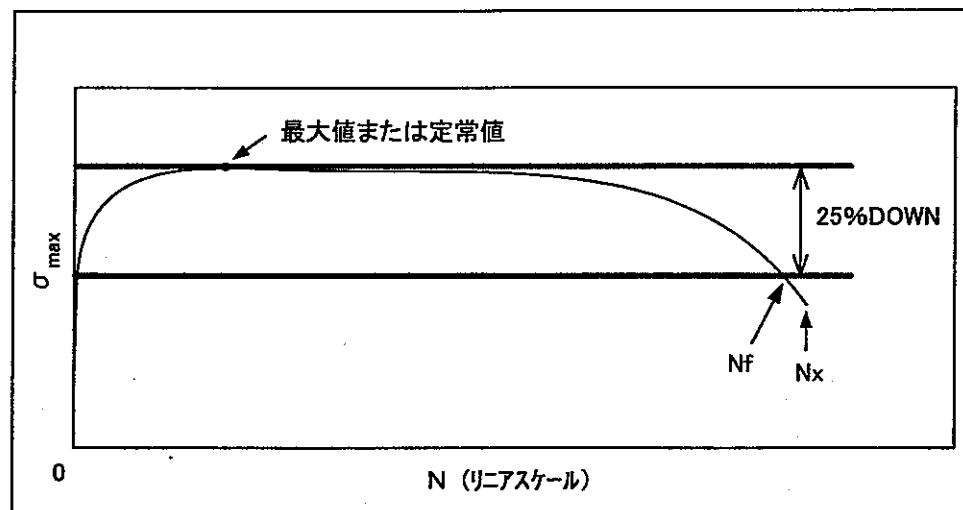
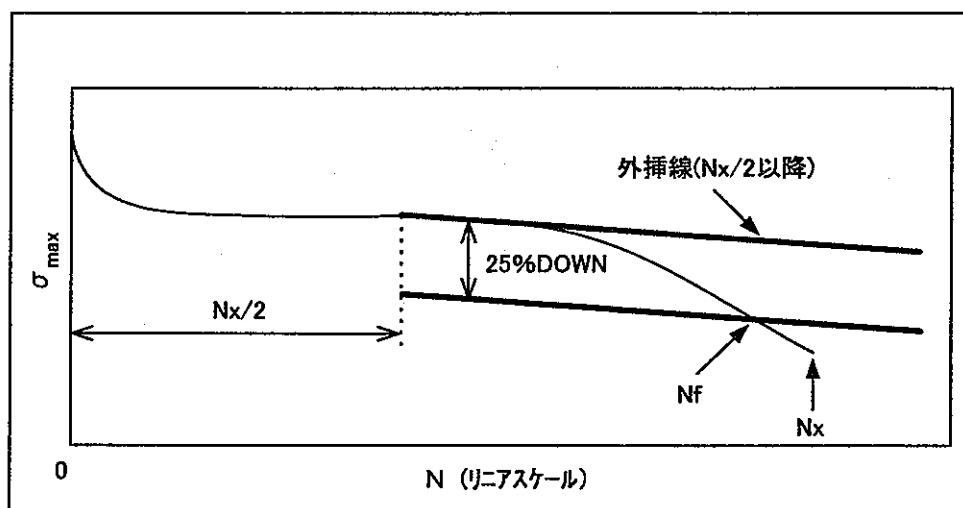


図2.4-16 ナトリウム中疲労試験温度測定制御方法



硬化材



軟化材

図2.4-17 破損繰り返し数の求め方

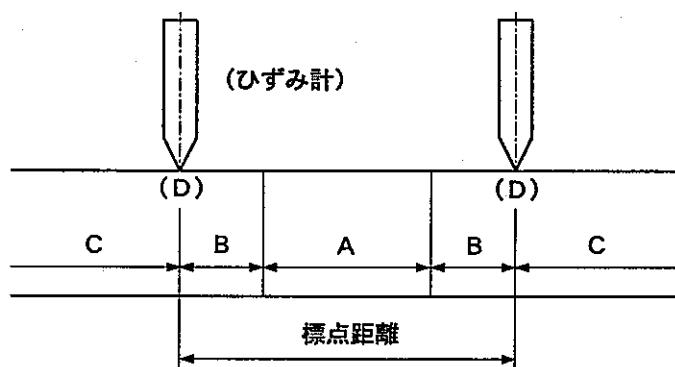


図2.4-18 破損位置の明示方法（母材及び溶金）

謝 辞

本要領書を作成するに当たり、常陽産業株式会社の川島 成一氏、鈴木 高一氏、ならびに黒子 耕一氏をはじめとする方々には、多大なご協力をいただきました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- [1] 「高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」 PNC TN241 84-08(2) (2)(1984)
- [2] 「F B R 金属材料試験実施要領書」 PNC TN241 77-03(1977)
- [3] 北川正樹他、「低サイクル疲労に関する VAMAS ラウンドロビン試験」、日本鉄鋼協会、鉄と鋼、第 78 年、第 9 号(1992)
- [4] 伊藤他、「長時間クリープ試験に使用した R 熱電対の劣化」 金属材料技術研究所 (1986)
- [5] 小峰他、「高速炉構造材料に関する疲労試験方法の標準化に関する試験技術のまとめ」 PNC TN9440 91-004(1991)

Appendix2.1 引張試験

- Appendix2.1-1 溶接に関する用語の定義
- Appendix2.1-2 引張試験装置仕様一覧
- Appendix2.1-3 大気中引張試験装置の構成図
- Appendix2.1-4 引張試験片つかみ部の外観図
- Appendix2.1-5 引張系オンラインデータ収集システムの構成
- Appendix2.1-6 弧状試験片の断面積の求め方
- Appendix2.1-7 F B R金属材料試験データシート（引張）
- Appendix2.1-8 引張試験データ（グラフ）
- Appendix2.1-9 構造材料試験データ処理システム（S M A T）

Appendix2. 1-1 溶接に関する用語の定義（共通）

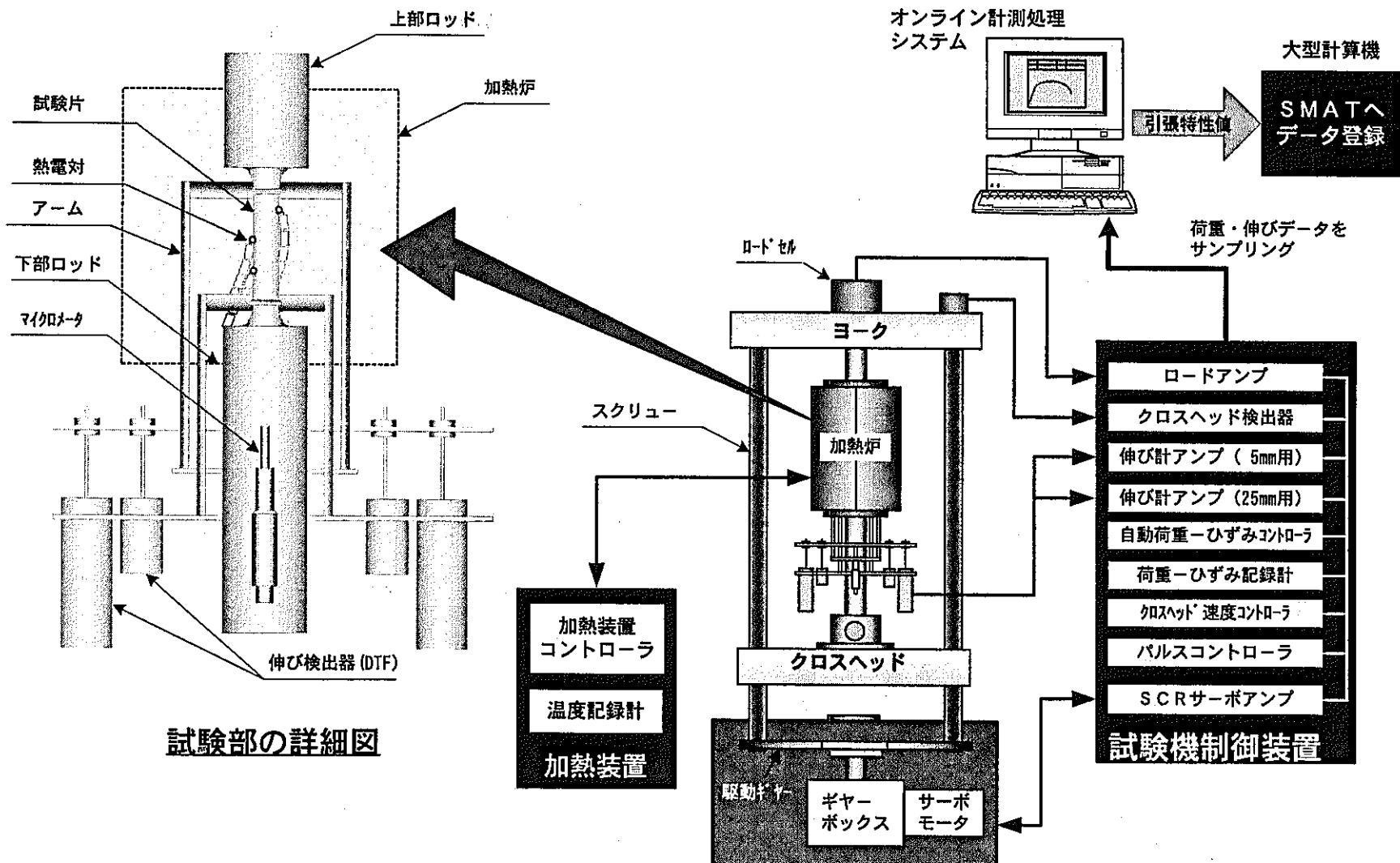
No.	用語	標準記号	定義
1	溶接 (Welding)	—	2個以上の部材を、接合される部材間に連続性があるように、熱、圧力またはその両方によつて一体にする操作。
2	手溶接 (Manual Welding)	—	溶接操作を手で行う溶接。
3	自動溶接 (Automatic Welding)	—	操作者が常時操作しなくても連続的に溶接が進行する装置を用いて行う溶接。
4	電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding)	E BW	真空中で発生させた高速の電子ビームを当て、その衝撃発熱を利用して行う溶接。
5	被覆アーク溶接 (Shielded Metal Arc Welding)	—	被覆アーク溶接棒を用いて行う溶接。
6	サブマージアーク溶接 (Submerged Arc Welding)	SAW	フラックス中において、溶接ワイヤと母材との間のアークから生じるアーク熱で溶接する方法
7	ティグ溶接(Tungsten Inert Gas Welding)	TIG	非溶極式のイナートガスアーク溶接で、タンゲステンまたはタンゲステン合金を電極とする溶接
8	ミグ溶接(Metal Inert Gas Welding)	MIG	溶極式のイナートガスアーク溶接の一種で、溶接ワイヤを電極とする溶接。
9	プラズマアーク溶接 (Plasma Arc Welding)	PAW	電極と母材との間に発生させるプラズマアークの熱で行う溶接。
10	被覆アーク溶接棒 (Covered Electrode)	—	アーク溶接の電極として用いる溶接棒で、フラックスを施してあるもの。溶接棒ともいう。
11	心線 (Core Wire)	—	被覆アーク溶接棒における金属線。
12	シールドガス (Shielding Gas)	—	溶接中にアークと溶融金属とを覆い、空気が溶接雰囲気に侵入することを防ぐためのガス。
13	溶加材 (Filler Metal)	—	溶接中に付加される金属（材料）。
14	溶接部 (Weld Zone)	—	溶接金属及び熱影響部を含んだ部分の総称。
15	熱影響部 (Heat-affected Zone)	—	溶接・切断などの熱で組織、冶金的性質、機械的性質などが変化を生じた、溶融していない母材の部分。
16	溶着金属 (Deposited Metal)	—	溶加材から溶接部に移行した金属。

Appendix2. 1-1 (続き) 溶接に関する用語の定義 (共通)

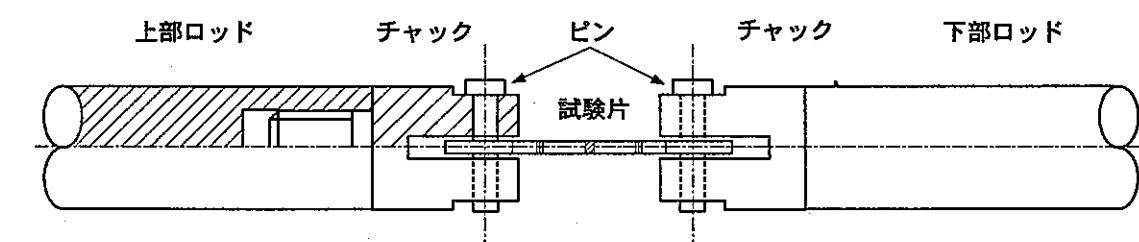
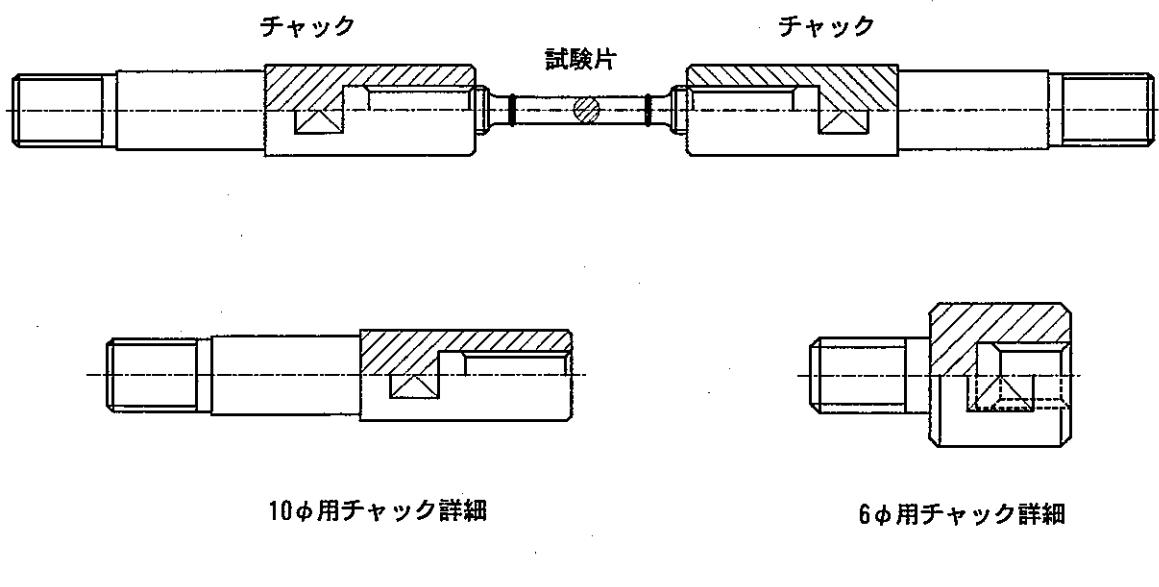
No.	用語	標準記号	定義
17	溶接金属 (Weld Metal)	—	溶接部の一部で、溶接中に溶融凝固した金属。
18	溶融部 (Fusion Zone)	—	溶接部の中で母材が溶融した部分。
19	ボンド部 (Weld Junction)	—	溶接部(溶接金属)と母材との境界の部分。境界付近を併せて呼ぶこともある。固相溶接、ろう接のように溶接金属がない場合には、母材間の境界または溶加材と母材との境界をいう。
20	開先形状 (Groove Preparation)	—	溶接する母材間に設ける溝の形状。
21	溶接姿勢 (Welding Position)	—	溶接作業者が溶接するときの溶接部に対する姿勢。下向、横向、立向及び上向の4姿勢がある。
22	層 (Layer)	—	1つまたはそれ以上のパスからなる溶接金属の層。
23	パス (Pass)	—	溶接継手に沿って行う1回の溶接操作。パスの結果できたものがビードである。
24	パス間温度 (Interpass Temperature)	—	多パス溶接において、次のパスの始められる前のパスの最低温度。1パス1層時のパス間温度を層間温度という。
25	積層 (Build-up)	—	溶接線に沿って行う2層以上の溶接操作。
26	予熱 (Preheating)	—	溶接または熱切断の操作に先立って母材に熱を加えること。
27	入熱 (Heat Input)	H	溶接の際、外部から溶接部に与えられる熱量。アーク溶接においては、アークが溶接ビードの単位長さ(1cm)当たりに発生する電気エネルギー $-H(J/cm)$ で表され、アーク電圧 $E(V)$ 、アーク電流 $I(A)$ 、溶接速度 $v(cm/min)$ とすると $H=60EI/v$ で与えられる。
28	フェライト量 (Ferrite Content)	—	オーステナイト系低合金鋼溶接金属中に含まれるフェライト組織の含有量。測定方法は、磁気的な方法及び組織図による方法がある。
29	溶接後熱処理 (Postheat Treatment)	—	溶接後、溶接部または溶接構造物に行う熱処理。

Appendix2.1-2 引張試験装置仕様一覧

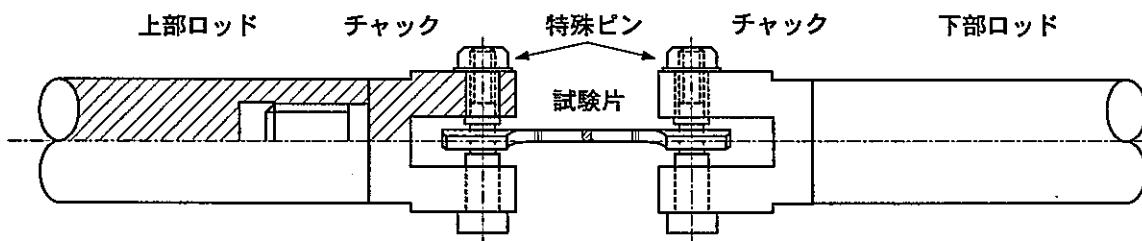
試験機 No.		TT-1	TT-3
仕 様			
試 験 機 本 体	1) 型式	オートグラフ DSS-25T	
	2) 秤量	MAX. 25ton	
	3) 有効試験幅	600mm	
	4) クロスヘッドストローク	1250mm	
	5) クロスヘッド速度	0.005~500mm/min 21段切換	
	6) クロスヘッド速度精度	全速度に対して±0.1%	
	7) クロスヘッド速度設定方式	デジタル式	
伸び測定装置	1) 型式	試験片ツバ間変位測定式	
	2) 検出器	DTF: DT-5型は耐力までを測定 DT-25型は耐力以降を測定	
	3) 測定範囲	DT-5型 5, 2.5, 1, 0.5mm/F.S 精度 1%/F.S DT-2型 25, 12.5, 5, 2.5mm/F.S 精度 1%/F.S	
加熱装置	高温用	1) 型式	半割型管状電気炉
		2) 容量	3kW
		3) 制御温度範囲	300~900°C
		4) 制御方式	PID多点同時制御方式
加熱装置	超高温用	1) 型式	半割型管状電気炉
		2) 容量	5kW
		3) 制御温度範囲	800~1600°C
		4) 制御方式	PID制御方式



Appendix2. 1-3 大気中引張試験装置の構成図

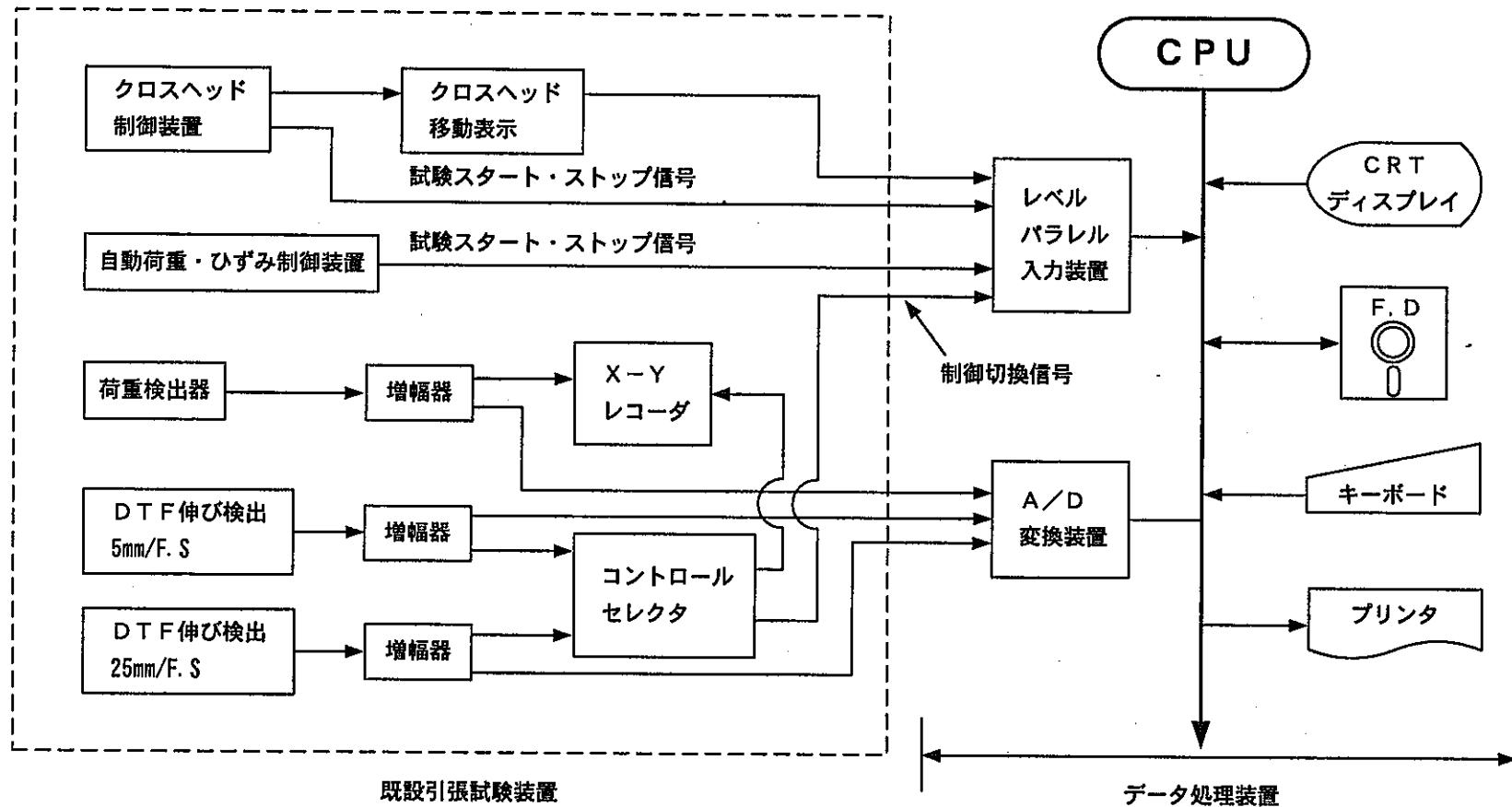


板状用チャック取り付け図



弧状用チャック取り付け図

Appendix2.1-4 引張試験片つかみ部の外観図



Appendix2.1-5 引張系オンラインデータ収集システムの構成

Appendix2. 1-6 弧状試験片の断面積の求め方

弧状試験片の断面積は以下の式から算出する。

$$S = S_1 + T_1 - S_2$$

$$T_1 = w(r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos \theta_2)$$

$$S_1 = 2\theta_1 / 2\pi \times \pi r_1^2 - 1/2 \times r_1 \cos \theta_1 \times 2r_1 \sin \theta_1 \\ = r_1^2 (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)$$

$$S_2 = r_2^2 (\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2)$$

$$\text{ただし } r_1 \sin \theta_1 = w/2 \rightarrow \theta_1 = \sin^{-1}(w/2r_1)$$

$$r_2 \sin \theta_2 = w/2 \rightarrow \theta_2 = \sin^{-1}(w/2r_2)$$

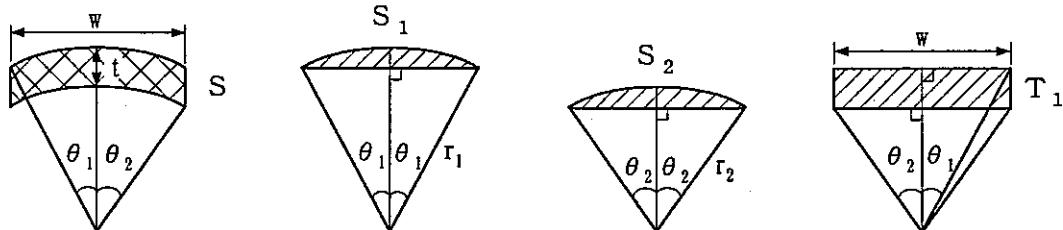
$$r_2 = r_1 - t$$

r_1 : 外径

r_2 : 内径

t : 厚さ

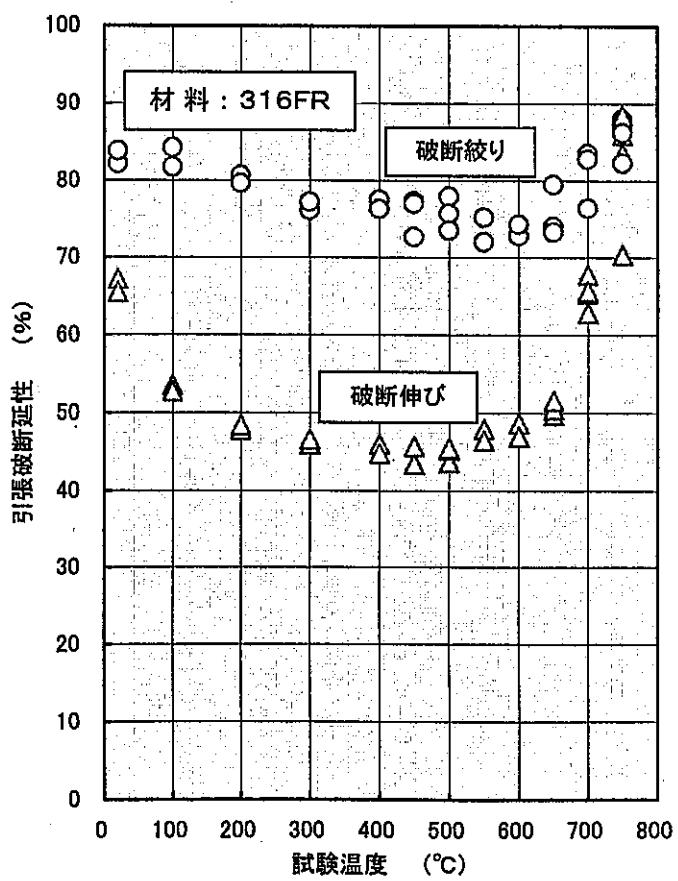
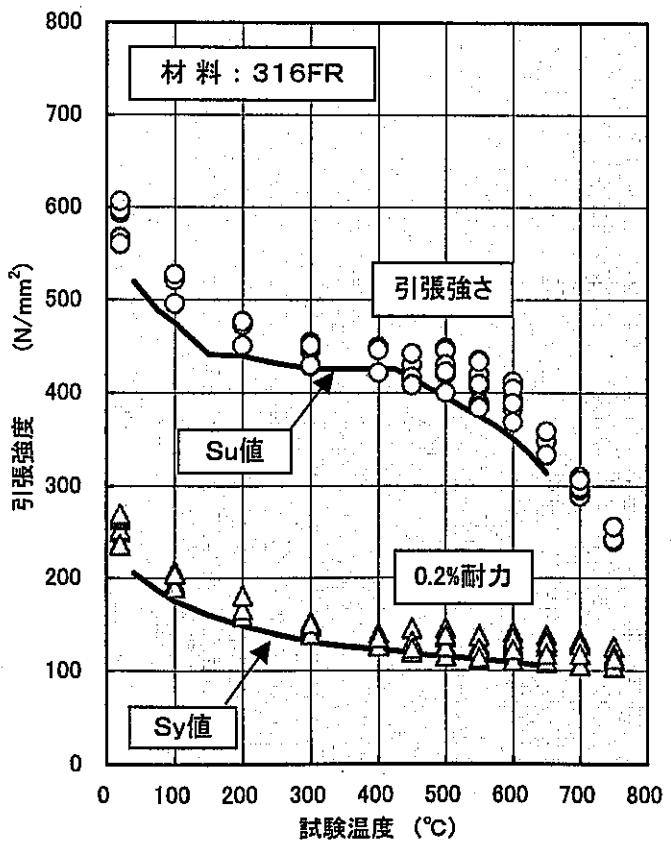
w : 幅

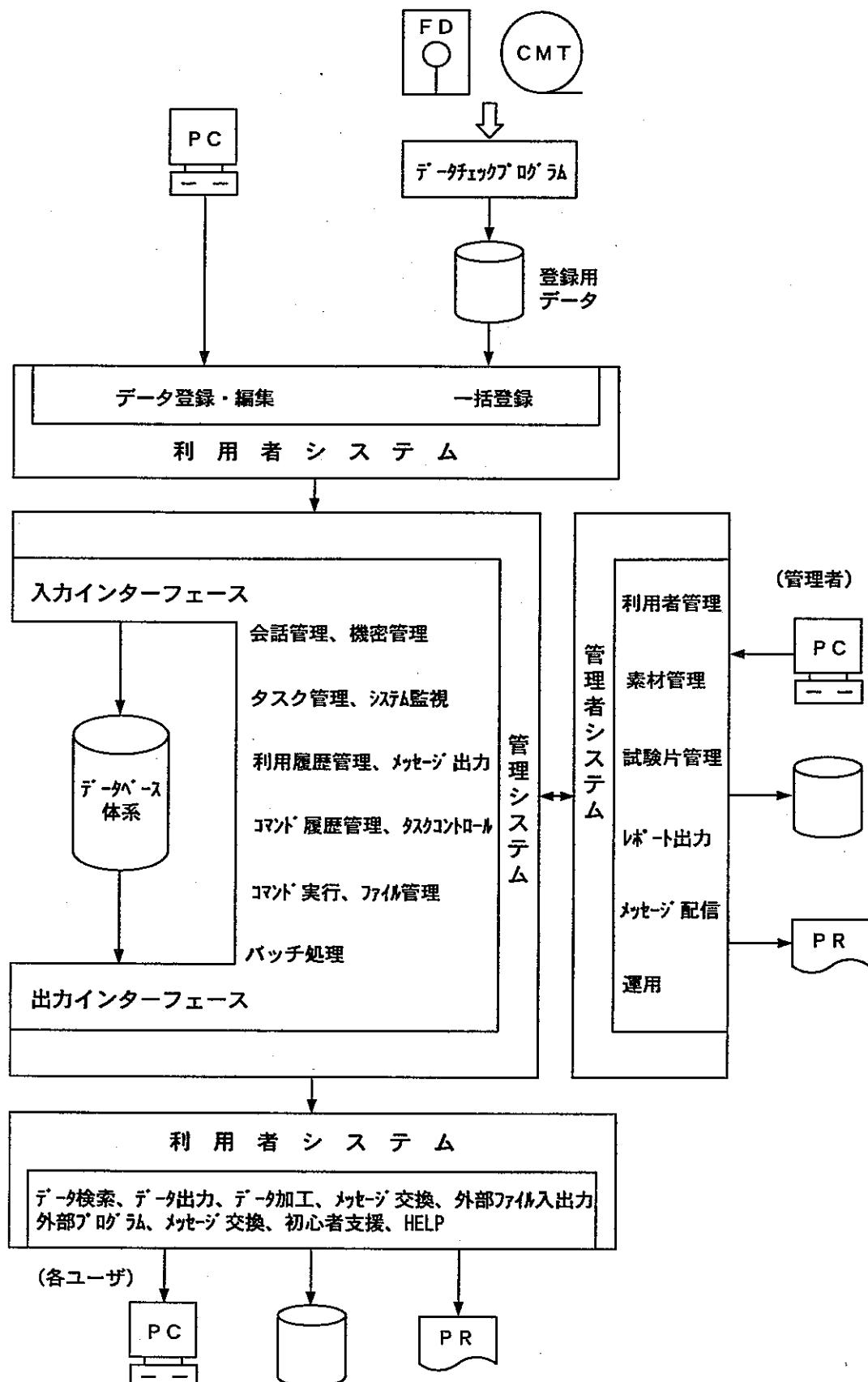


Appendix2.1-7 FBR金属材料試験データシート(引張)

試験雰囲気	ひずみ速度-1(%/min)	設定ひずみ-1(%)		ひずみ速度-2(%/min)		設定ひずみ-2(%)		真の特性					
1	0.3	3		7.5				上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	4Dの伸び (%)	真破断強度(N/mm ²)	真一様伸び(%)	真破断延性(%)
試験片番号	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	絞り (%)	破断位置							
END8D2	20	252.8	593.9	67.2	82.2	A				1930.6	380.2	1691.5	
END8D3	20	263.6	596.8	65.5	83.9	A				2198.1	384.2	1789.5	
END8D4	100	207.8	521.4	53.6	84.3	A				1815.9	306.7	1815.0	
END8D5	100	204.8	527.2	52.8	81.8	A				1715.0	298.9	1669.9	
END8D6	200	166.6	473.3	47.8	80.7	A				1443.5	292.0	1612.1	
END8D7	200	181.3	477.3	48.4	79.7	A				1385.7	292.0	1563.1	
END8D8	300	152.9	454.7	46.0	76.2	A				1217.2	293.0	1406.3	
END8D9	300	150.9	451.8	46.6	77.3	A				1238.7	293.0	1453.3	
END8E0	400	140.1	449.8	46.0	77.6	A				1121.1	294.0	1466.1	
END8E1	400	135.2	446.9	44.8	76.4	A				1069.2	291.1	1415.1	
END8E3	450	131.3	443.0	45.7	72.7	A				1110.3	307.7	1272.0	
END8E5	500	127.4	428.3	45.3	75.8	A				1029.0	298.9	1390.6	
END8E4	500	125.4	431.2	45.5	73.6	A				1028.0	311.6	1305.4	
END8E6	550	126.4	414.5	48.0	75.3	A				1010.4	300.9	1370.0	
END8E7	550	128.4	420.4	46.5	72.1	A				1007.4	301.8	1251.5	
END8E8	600	129.4	394.0	48.7	72.9	A				961.4	293.0	1279.9	
END8E9	600	126.4	393.0	47.0	74.4	A				1035.2	302.8	1335.7	
END8F0	650	126.4	358.7	50.5	74.1	A				859.5	279.3	1324.0	
END8F1	650	131.3	358.7	51.6	73.4	A				853.6	282.2	1297.5	
END8F2	700	128.4	310.7	65.7	76.5	A				778.1	240.1	1419.0	
END8F5	750	112.7	255.8	70.4	82.4	A				616.4	209.7	1702.3	

Appendix2.1-8 引張試験データ





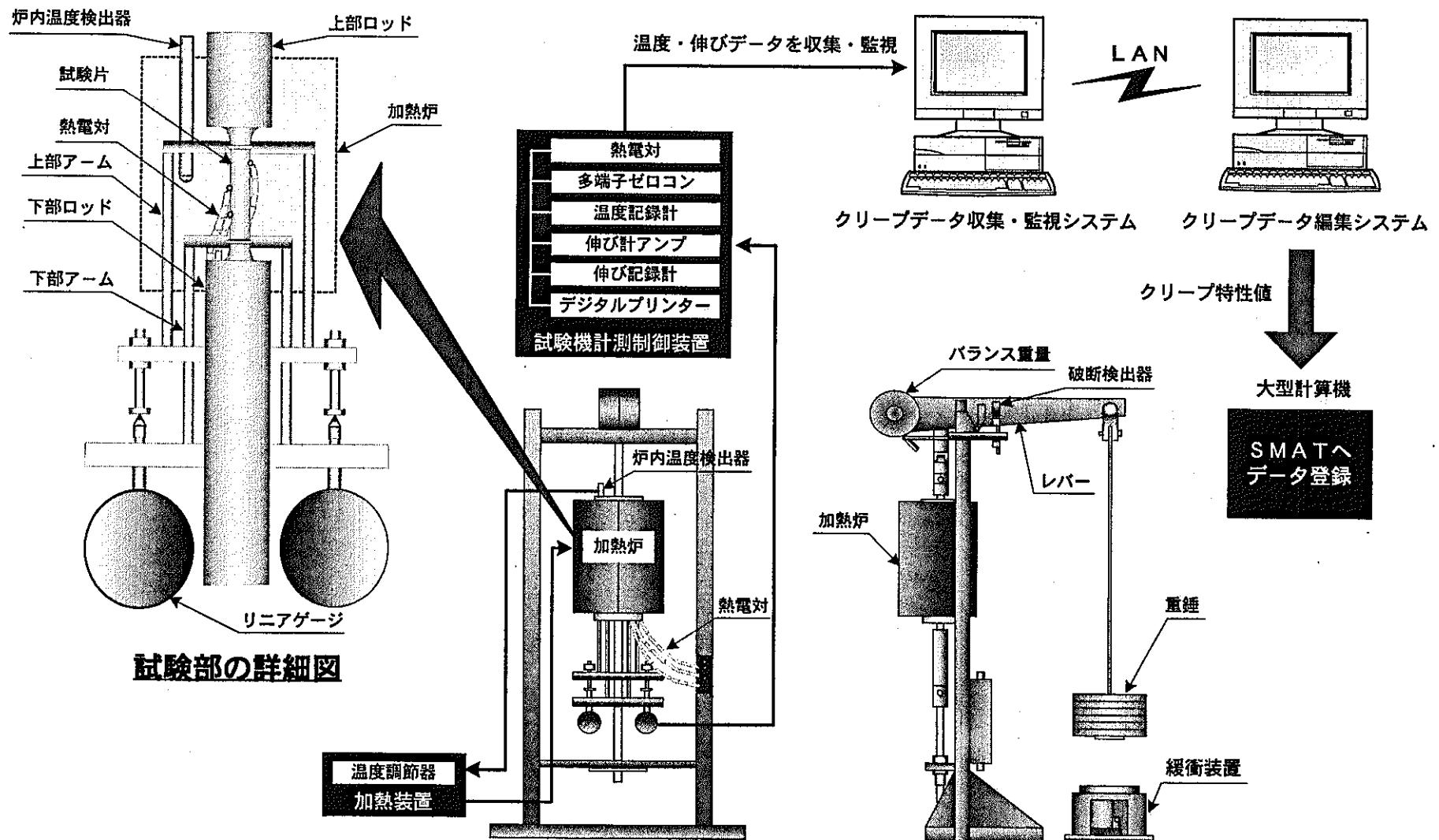
Appendix2.1-9 構造材料試験データ処理システム (SMAT)

Appendix2.2 クリープ試験

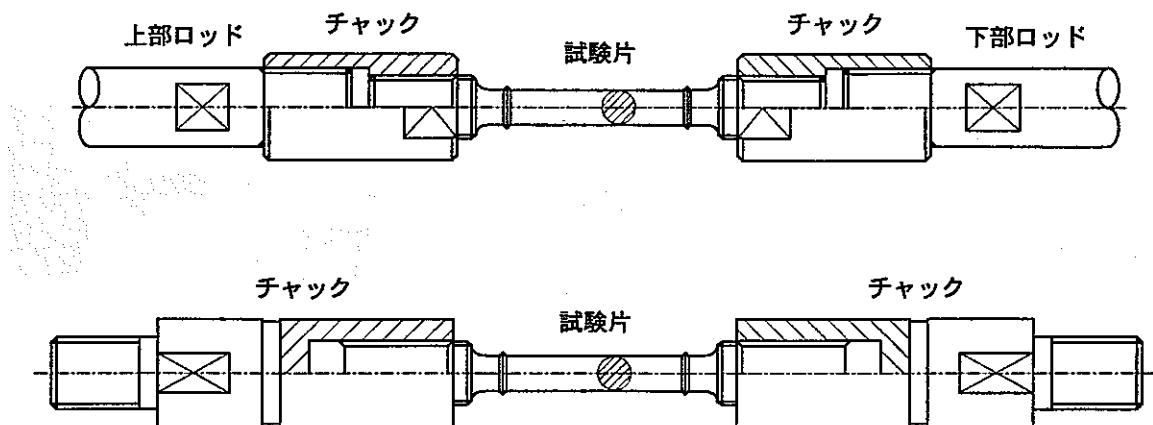
- Appendix2.2-1 クリープ試験装置仕様一覧
- Appendix2.2-2 大気中クリープ試験装置の構成図
- Appendix2.2-3 クリープ試験片つかみ部の外観図
- Appendix2.2-4 クリープ系オンラインデータ収集システム
- Appendix2.2-5 FBR金属材料試験データシート（クリープ）
- Appendix2.2-6 クリープ試験データ（グラフ）
- Appendix2.2-7 クリープ試験データ（グラフ）

Appendix2. 2-1 クリープ試験装置仕様一覧

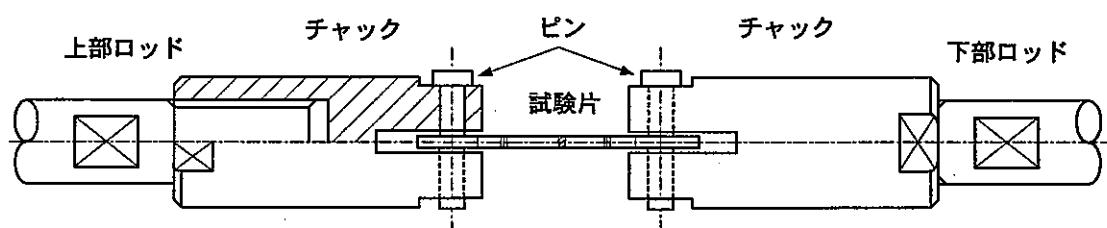
試験装置名		縦型二重 てこ荷重式	縦型單てこ荷重式				
試験機本体	1) 最大負荷容量	5000kg	750kg	3000kg	1500kg		
	2) LV-R比	1:40	1:10				
	3) 初荷重	100kg	0kg				
伸び測定装置	1) 型式	試験片ツバ間変位測定式					
	2) 検出器	リニアゲージ & ダイヤルゲージ		DTF & ダイヤルゲージ			
	3) 測定範囲	0~20mm					
	4) 測定レンジ	20, 10, 5, 2mm/F.S 精度 0.5%/F.S					
加熱装置	1) 型式	半割型管状電気炉					
	2) 容量	3kW					
	3) 制御温度範囲	300~1000°C					
	4) 制御方式	PID 制御方式					
試験機台数		5	5	36	30		
					15		



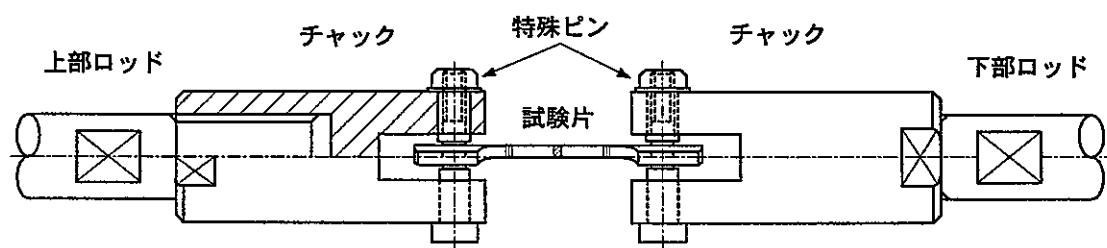
Appendix2. 2-2 大気中クリープ試験装置の構成図



丸棒用チャック取り付け図

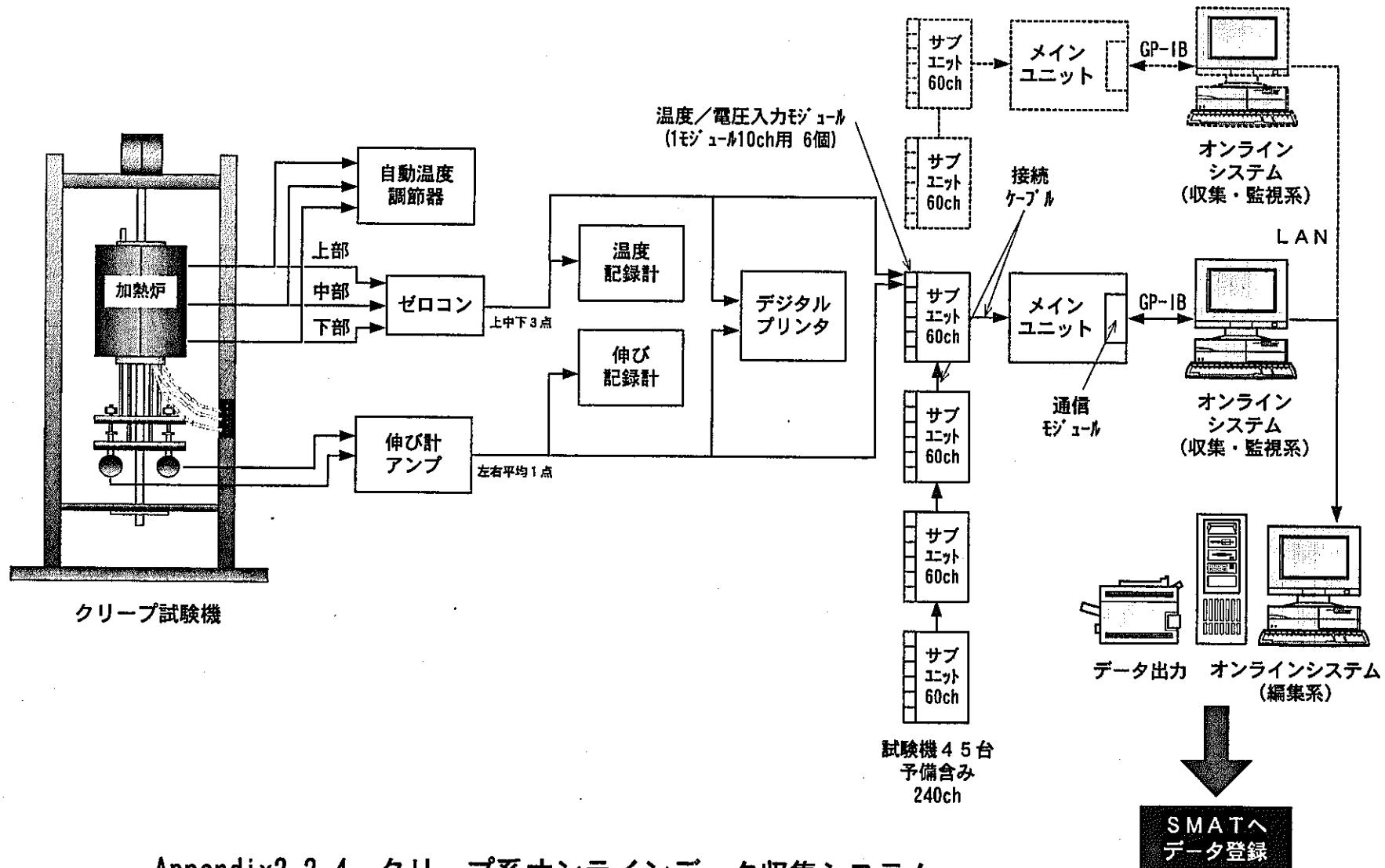


板状用チャック取り付け図



弧状用チャック取り付け図

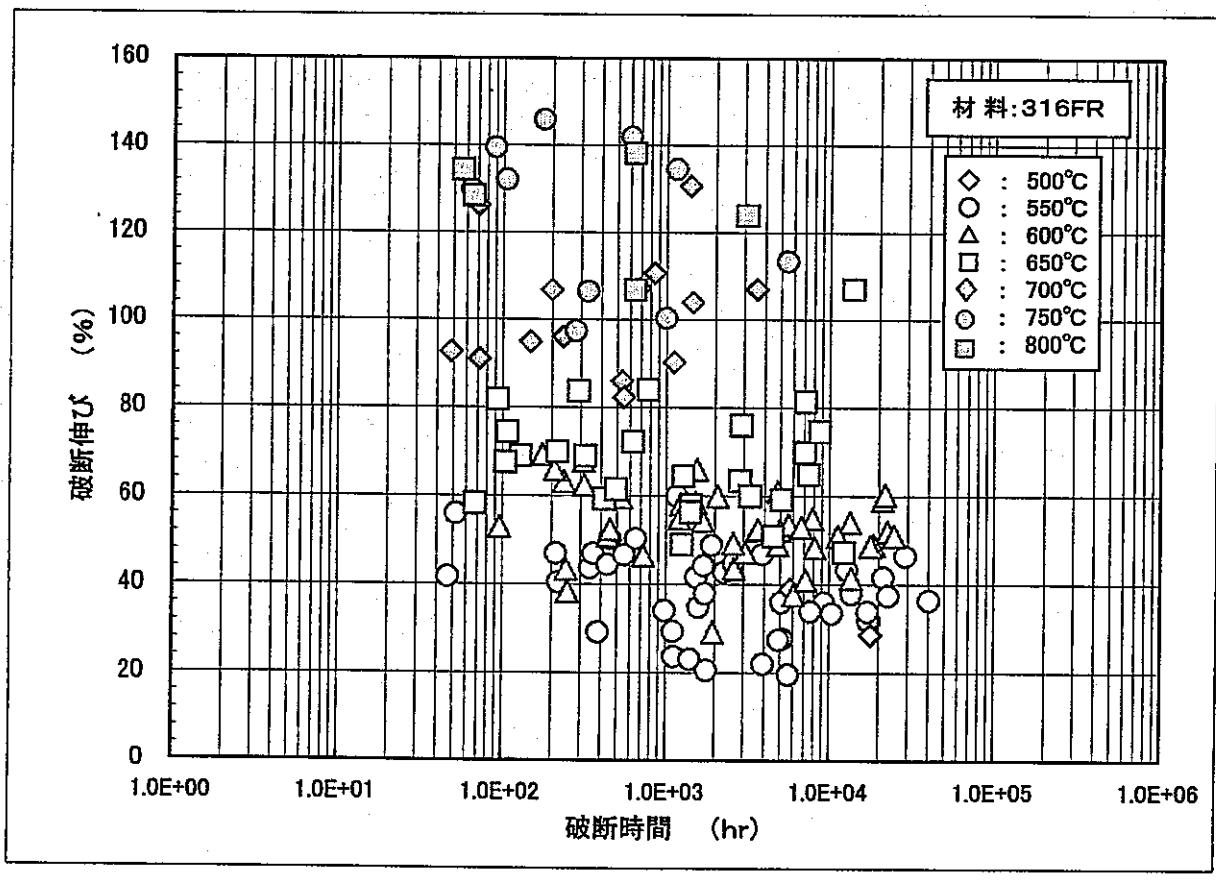
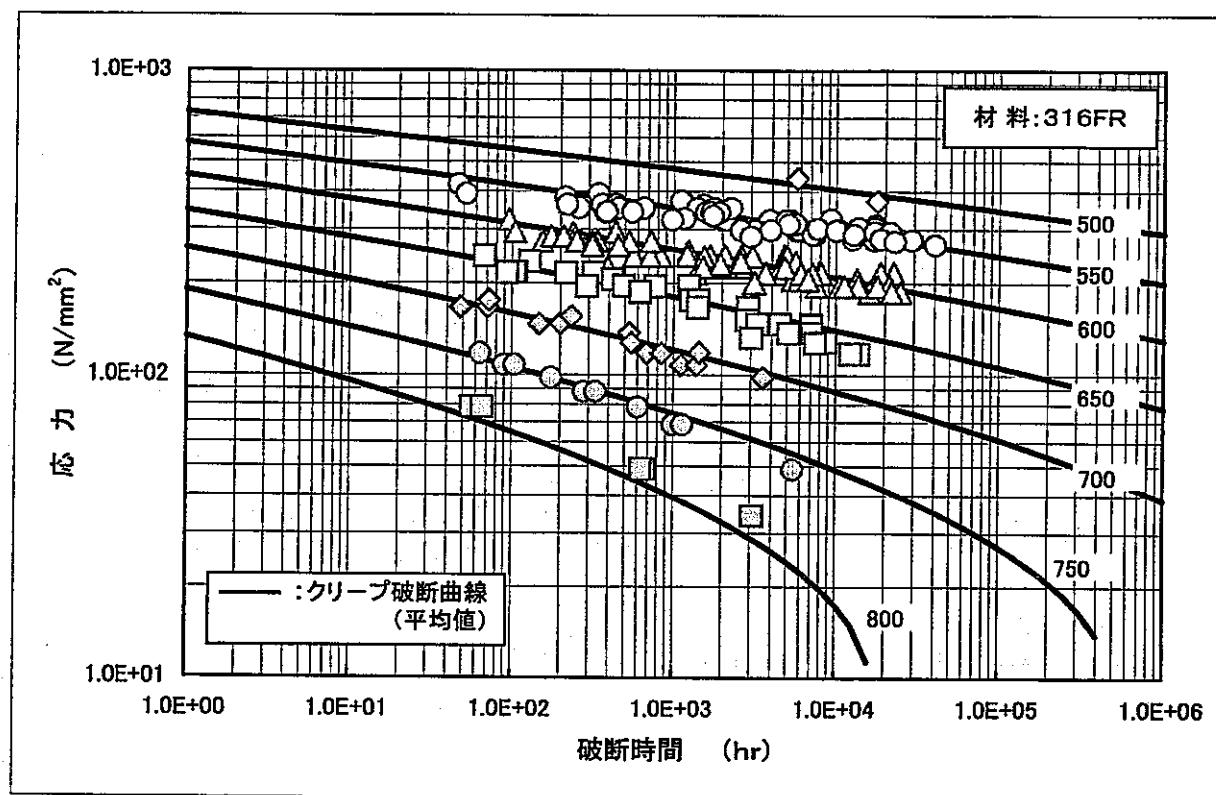
Appendix2.2-3 クリープ試験片つかみ部の外観図



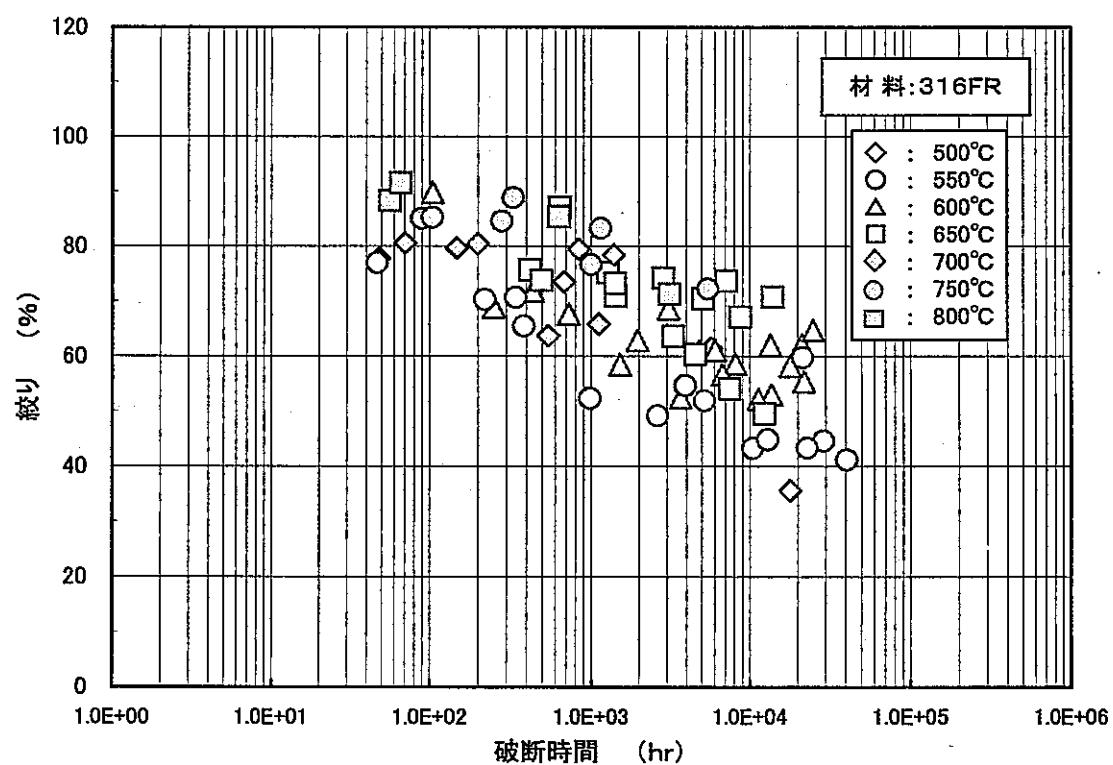
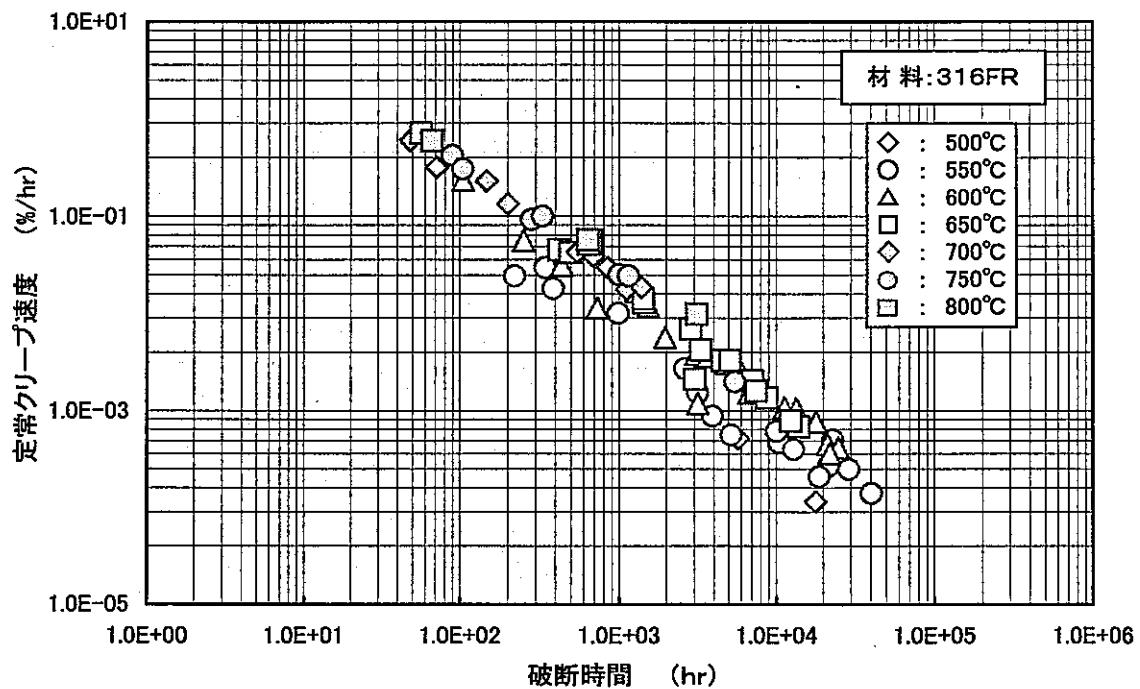
Appendix2.2-5 FBR金属材料試験データシート(クリープ)

試験雰囲気	1														
試験片番号	試験温度 (°C)	設定応力 (N/mm ²)	破断時間 (hr)	破断伸び (%)	絞り (%)	破断 位置	定常クリープ 速度 (%/hr)	負荷完了時 までの時間 (min)	負荷完了時 歪み (%)	一次クリープ 歪み(%)	二次クリープ 開始時間(hr)	歪み(%)	三次クリープ 開始時間(hr)	歪み(%)	試験 中断 回数
FMF8B4	500	372.6	17842.1	28.7	35.6	B	1.15E-04	6.0	17.457	0.151	440.0	1.359	10100.0	9.033	0
FN0BA0	550	323.6	3403.8	41.1	54.5	B	1.97E-03	4.0	12.662	0.715	350.0	2.979	1410.0	26.318	0
FNF8C4	550	300.1	10418.9	33.6	43.3	A	4.69E-04	5.0	11.162	0.503	560.0	2.278	4420.0	19.657	1
FNF8C0	550	277.5	29027.4	46.5	44.7	A	2.50E-04	5.0	8.432	0.592	1020.0	2.609	9638.0	34.867	2
FNF8C3	550	267.7	40303.2	36.5	41.2	B	1.42E-04	4.0	8.927	0.292	1650.6	1.912	12053.1	34.331	1
FNF8B2	600	274.6	726.2	46.6	67.7	A	1.15E-02	3.0	10.628	0.233	20.0	2.506	200.0	33.233	0
FNF8B3	600	225.6	4810.3	61.0	61.0	A	3.09E-03	2.0	5.353	1.036	180.0	4.402	1360.0	50.209	0
FNF8B4	600	205.9	13423.9	54.1	62.0	B	1.05E-03	3.0	4.780	0.489	580.0	6.049	5570.0	42.802	1
FNF8C5	600	188.3	24832.6	51.1	64.7	A	4.15E-04	3.0	3.217	1.078	3535.0	5.322	12339.0	41.483	1
FNF8B5	650	166.7	1416.1	56.4	73.2	B	1.43E-02	2.0	2.383	0.547	69.0	7.915	541.0	45.155	0
FNF8B6	650	137.3	7092.7	81.3	73.7	A	2.05E-03	2.0	1.220	0.710	390.0	4.977	2330.0	74.393	0
FNF8B7	650	117.7	13909.2	107.0	70.8	B	6.87E-04	2.0	0.253	0.467	800.0	2.331	3100.0	103.949	1
FNF8A8	700	166.7	70.7	126.3	80.6	A	3.18E-01	3.0	2.862	0.582	4.0	4.783	14.4	118.073	1
FNF8A9	700	147.1	199.8	106.7	80.4	A	1.35E-01	3.0	1.716	0.387	4.0	6.946	50.0	97.651	0
FNF8B0	700	117.7	843.9	110.7	79.5	A	2.99E-02	3.0	0.248	0.358	50.0	5.905	190.0	104.189	0
FNF8B1	700	107.9	1390.4	130.7	78.4	A	1.87E-02	2.0	0.169	0.124	30.0	8.254	430.0	121.632	0
FNF8A0	750	107.9	104.4	132.2	85.3	A	3.08E-01	2.0	0.250	0.148	2.0	8.523	27.0	123.279	1
FNF8A1	750	88.3	331.8	106.5	88.9	B	1.01E-01	1.0	0.111	0.238	10.0	6.858	66.0	99.293	0
FNF8A6	750	68.6	1147.5	134.6	83.3	A	2.46E-02	1.0	0.091	0.128	12.0	7.585	300.0	126.796	0
FNF8A7	750	49.0	5461.1	113.5	72.3	A	2.01E-03	1.0	0.018	0.061	30.0	1.007	405.0	112.414	0
FNF8A3	800	78.5	65.9	128.4	91.5	B	5.93E-01	1.0	0.095		1.0		20.8		0
FNF8A4	800	49.0	636.1	138.2	85.4	B	5.78E-02	2.0	0.042	0.416	80.0	17.933	307.0	119.809	1
FNF8A5	800	34.3	3102.3	123.9	71.3	A	1.00E-02	2.0	0.044	0.279	230.0	13.301	1310.0	110.276	0

Appendix2.2-6 クリープ試験データ



Appendix2.2-7 クリープ試験データ

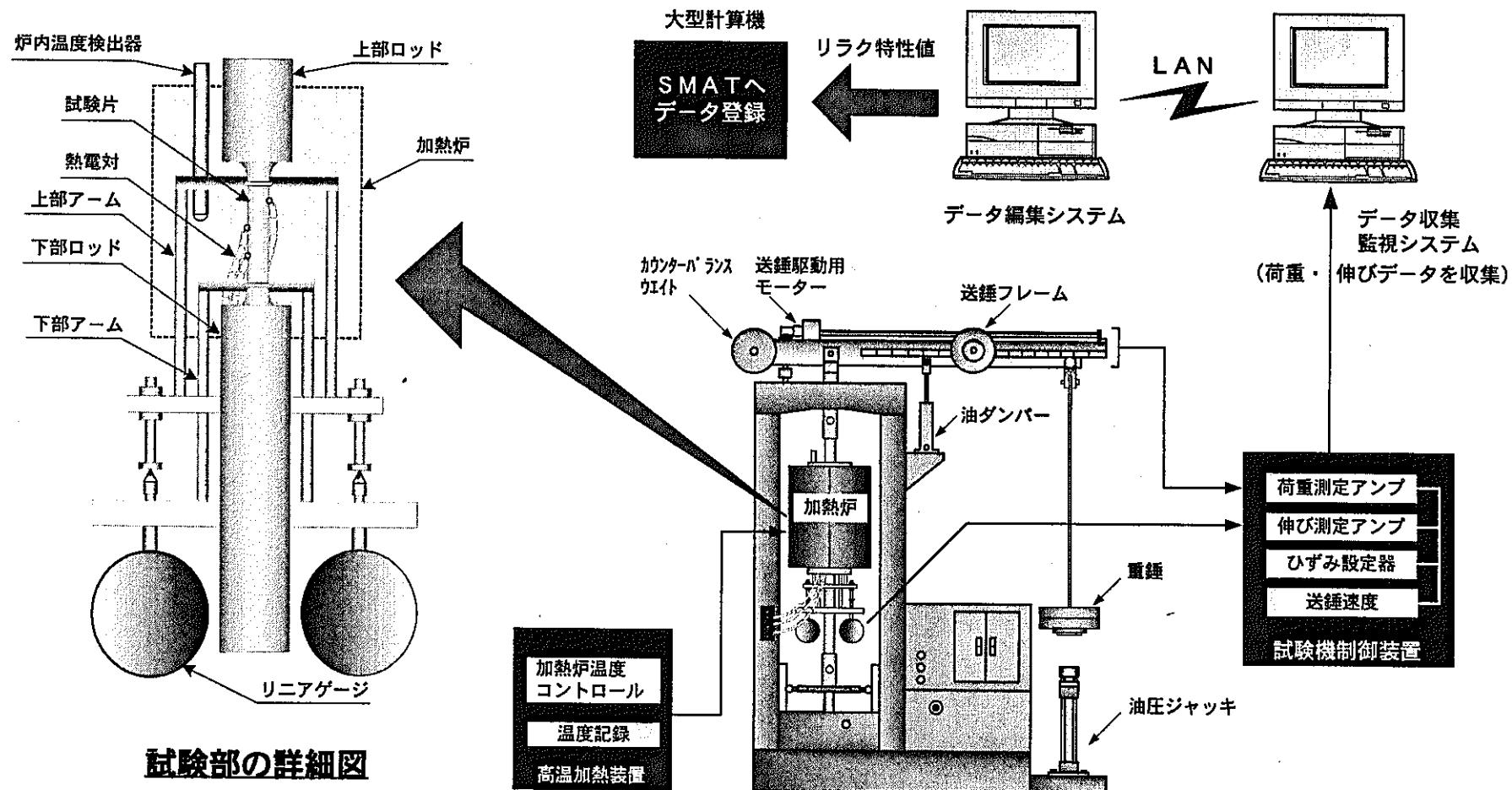


Appendix2.3 リラクセーション試験

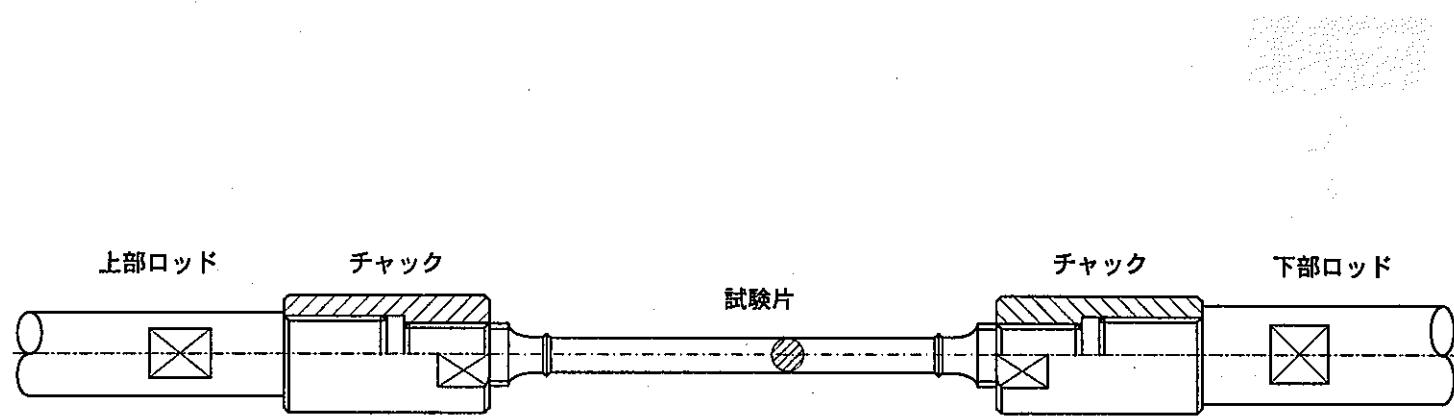
- Appendix2.3-1 リラクセーション試験装置仕様一覧
- Appendix2.3-2 リラクセーション試験装置の構成図
- Appendix2.3-3 リラクセーション試験片つかみ部の外観図
- Appendix2.3-4 リラクセーション系オンラインデータ収集システム
- Appendix2.3-5 FBR金属材料試験データシート（リラクセーション）
- Appendix2.3-6 リラクセーション試験データ（グラフ）

Appendix2. 3-1 リラクセーション試験装置仕様一覧

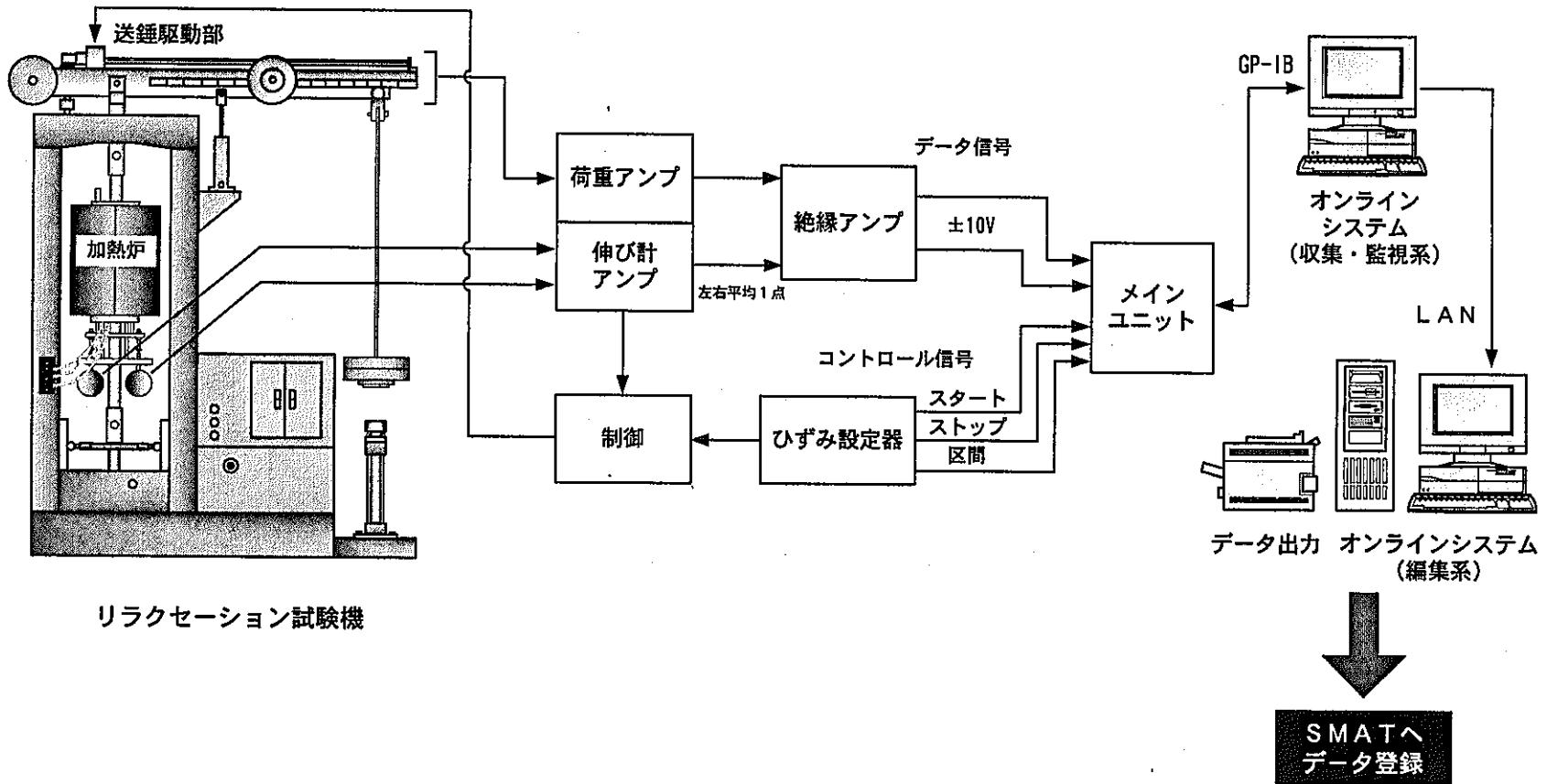
仕 様	試験機 No.	AR-1, 2
1. 試験機本体		
(1) 形 式	タテ型単テコ荷重式 RX-30型	
(2) 最大負荷容量	3000kg	
(3) レバー比	1 : 20	
(4) 荷重精度	± 0.5 %	
(5) 送錐速度	Max. 130 sec./フルストローク	
2. 伸び測定装置		G. L間伸びを検出し、送錐移動により伸びを一定にする形式
(1) 形 式	デジタルリニアゲージ	
(2) 伸び検出器	0.5 μ以内	
(3) 検出感度	設定範囲 0~3mm	
(4) ひずみ設定器		
3. 加熱装置		
(1) 形 式	半割型管状電気炉	
(2) 容 量	3kW	
(3) 制御温度範囲	200°C~800°C	
(4) 制御方式	PID制御方式	



Appendix2. 3-2 リラクセーション試験装置の構成図



Appendix2. 3-3 リラクセーション試験片つかみ部の外観図

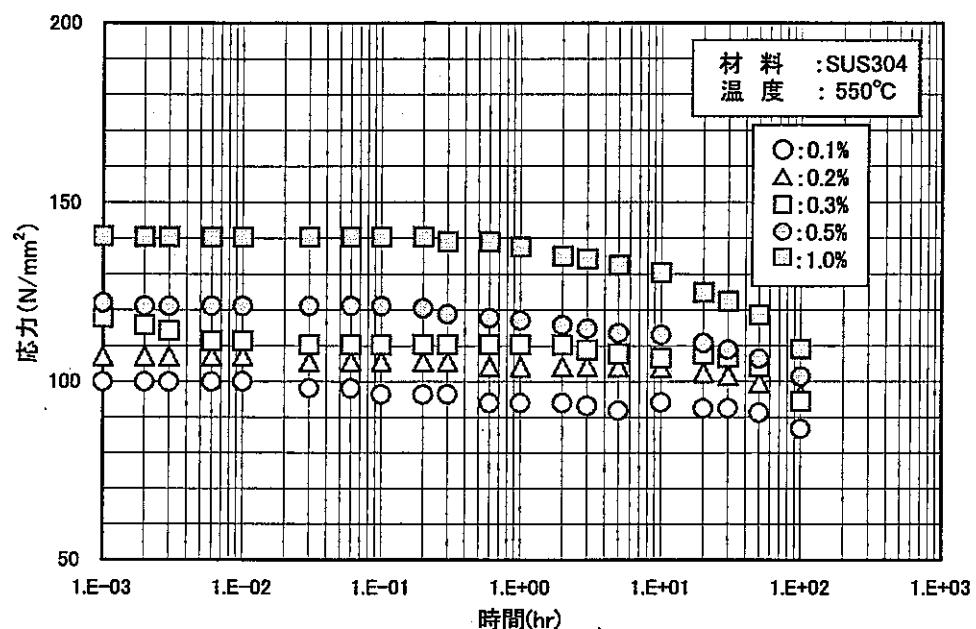


Appendix2.3-4 リラクセーション系オンラインデータ収集システム

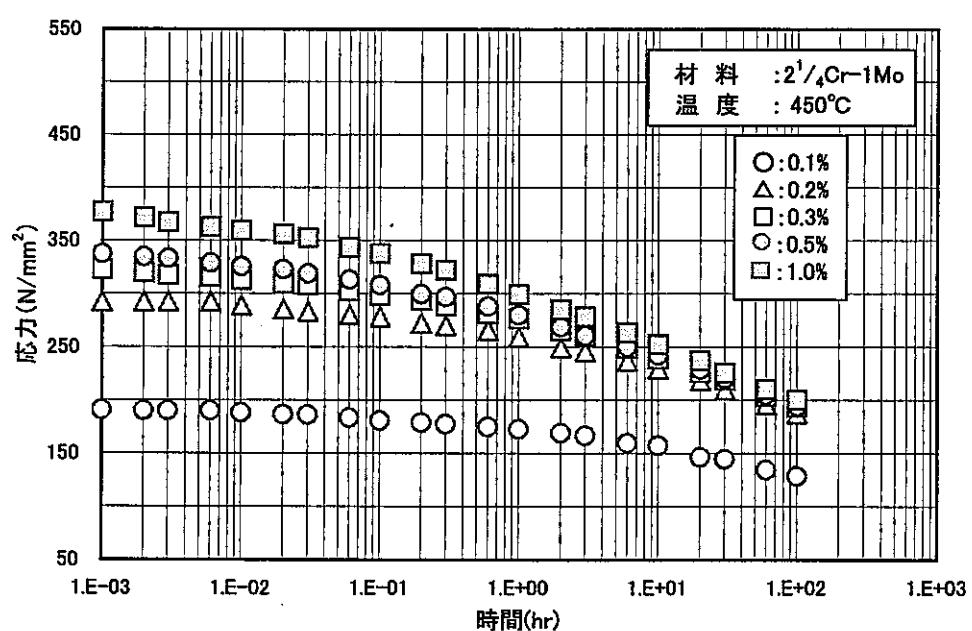
Appendix2.3-5 FBR金属材料試験データシート(リラクセーション)

試験雰囲気 大気中	試験片番号	試験温度 (°C)	設定全ひずみ (%)	初期応力 (N/mm ²)	負荷完了迄の時間 (min)	荷重保持時間 (sec)	試験時間 (hr)	最終応力 (N/mm ²)
	ABR107	550	0.1	102.0	3.10	13	100	86.8
	ABR108	550	0.2	110.3	3.10	15	100	96.4
	ABR102	550	0.3	119.9	3.33	7.5	100	94.5
	ABR103	550	0.5	123.0	3.33	7	100	101.4
	ABR106	550	1.0	140.6	3.55	15	100	109.1
	GCG3A8	450	0.1	192.9	3.10	30	100	128.8
	GCG3C4	450	0.2	295.5	3.10	23	100	187.6
	GCG3B4	450	0.3	326.4	3.33	30	100	193.5
	GCG3C0	450	0.5	348.1	3.33	28	100	194.3
	GCG3C7	450	1.0	388.8	3.55	30	100	200.2

Appendix2.3-6 リラクセーション試験



SUS304鋼の550°Cにおける応力緩和曲線



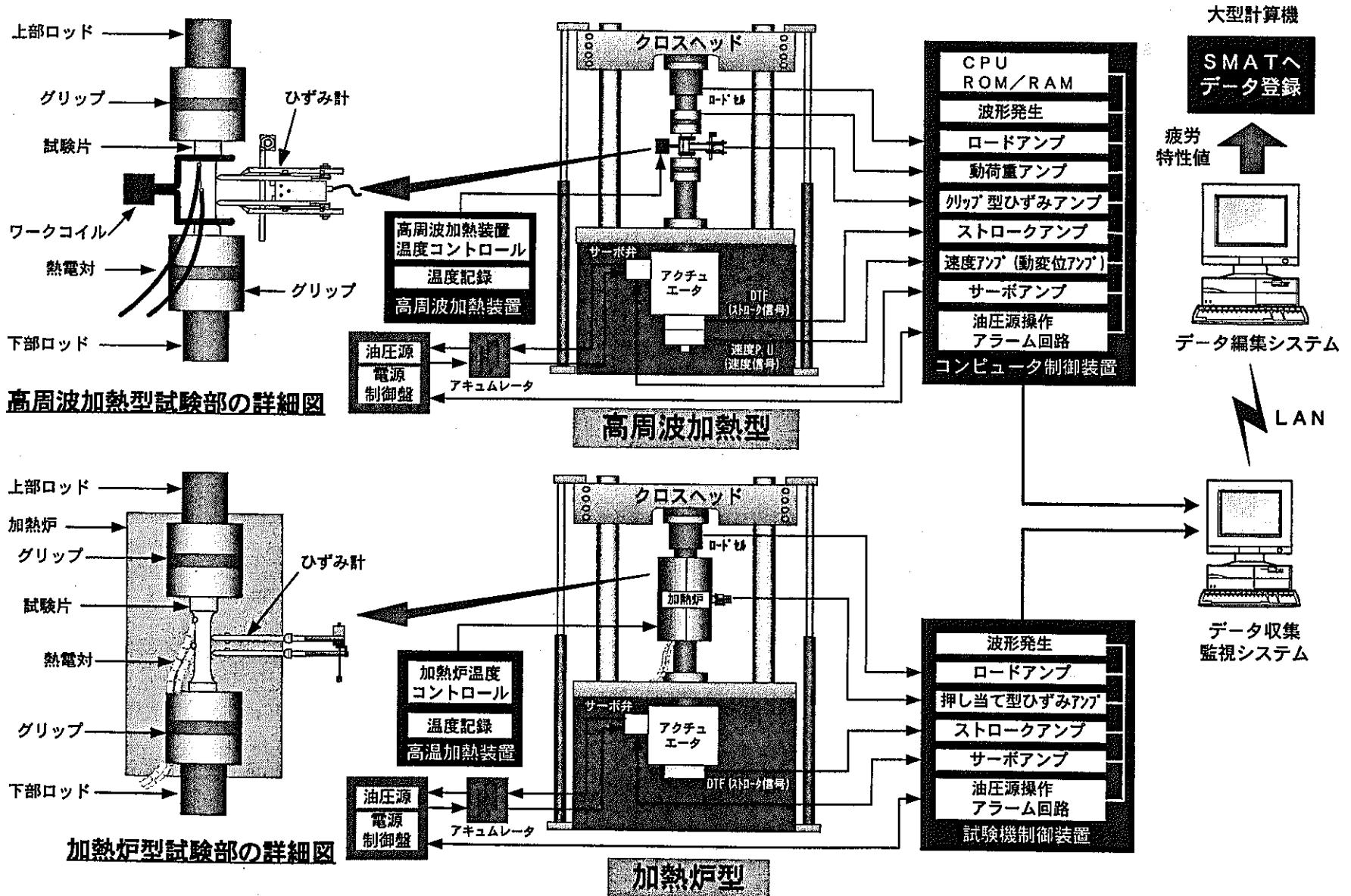
2 1/4 Cr-1 Mo鋼の450°Cにおける応力緩和曲線

Appendix2.4 低サイクル疲労試験

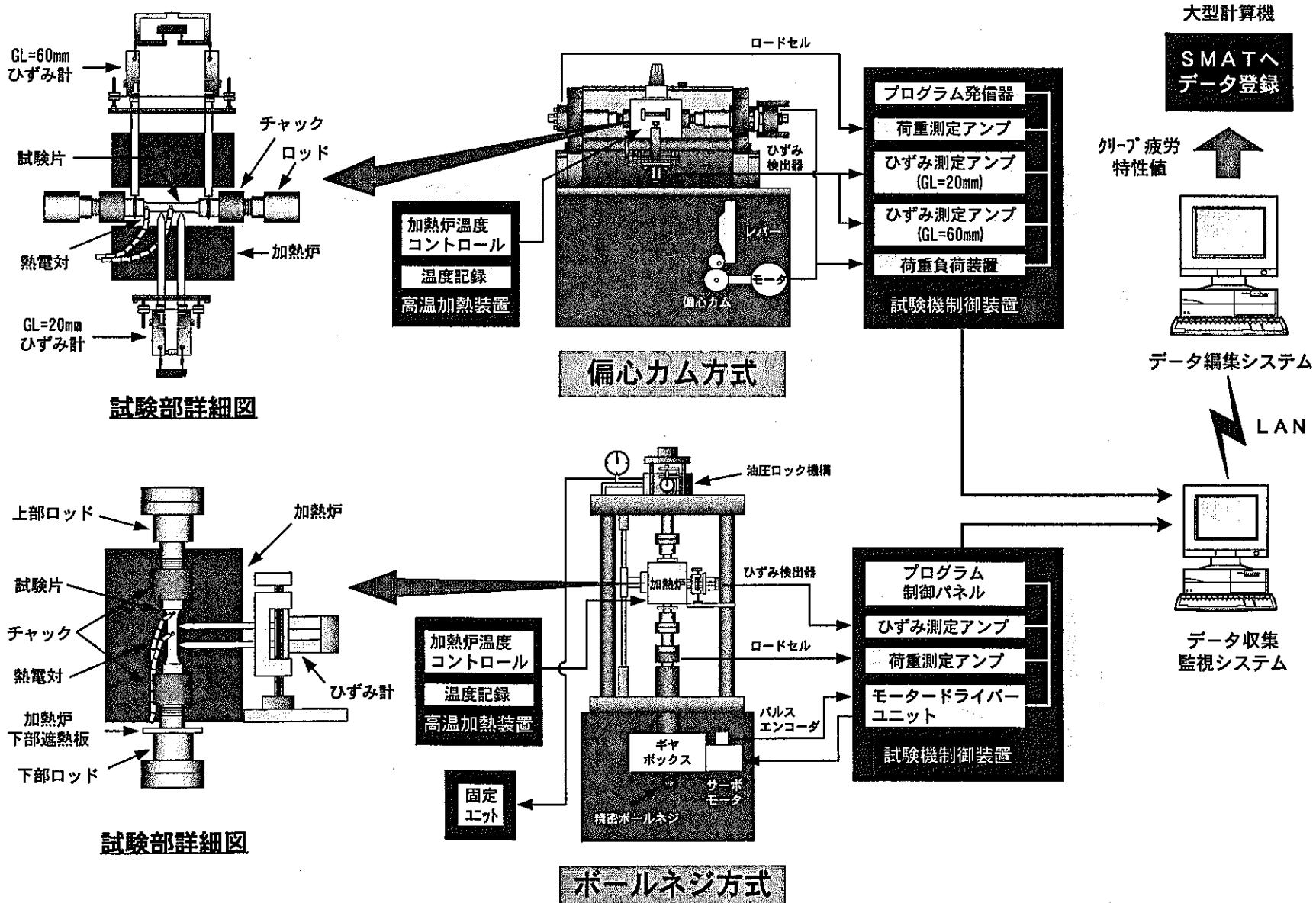
- Appendix2.4-1 疲労試験装置仕様一覧
- Appendix2.4-2 電気油圧サーボ制御方式疲労試験装置の構成図
- Appendix2.4-3 電気サーボモータ制御方式疲労試験装置の構成図
- Appendix2.4-4 疲労試験片つかみ部の外観図（油圧サーボ式）
- Appendix2.4-5 長時間クリープ疲労試験片つかみ部の外観図（電気サーボモータ式）
- Appendix2.4-6 疲労試験用ひずみ計の外観図（油圧サーボ式）
- Appendix2.4-7 疲労試験用ひずみ計の外観図（電気サーボモータ式）
- Appendix2.4-8 ナトリウム中疲労試験用ひずみ計の外観図（油圧サーボ式）
- Appendix2.4-9 疲労系オンラインデータ収集システム
- Appendix2.4-10 ワークコイルの製作及び調整方法
- Appendix2.4-11 F B R 金属材料試験データシート（疲労）
- Appendix2.4-12 ヒステリシスループの代表例
- Appendix2.4-13 低サイクル疲労試験データ（グラフ）
- Appendix2.4-14 長時間クリープ疲労試験データ（グラフ）
- Appendix2.4-15 ナトリウム中疲労試験におけるひずみ較正方法

Appendix2. 4-1 疲労試験装置仕様一覧

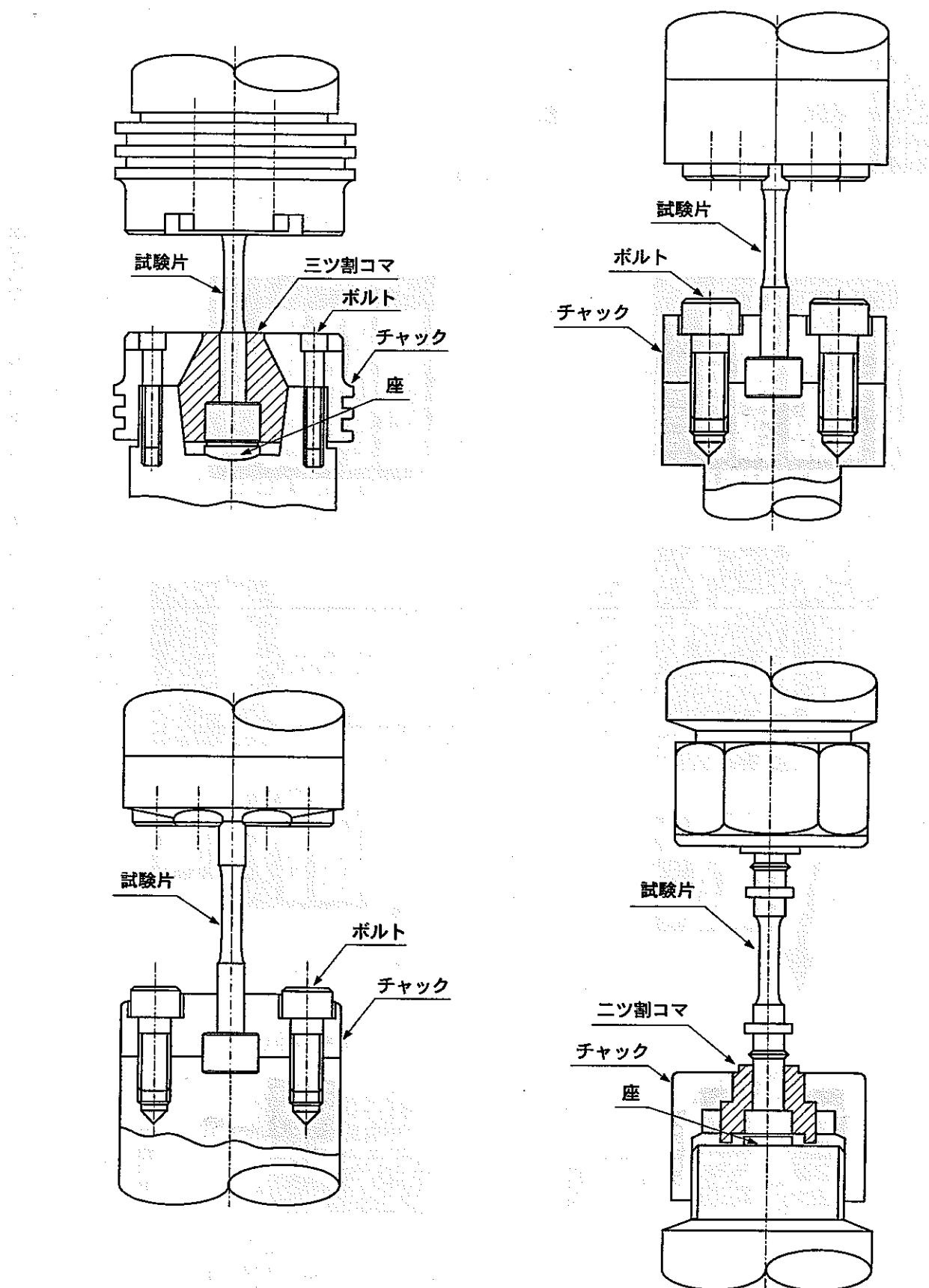
	試験装置名	電気油圧サーボ制御方式		電気サーボモータ制御 ポールネジ方式	電気サーボモータ制御 偏心カム方式
		試験雰囲気	大気中	Na中&大気中	大気中
繰り返し負荷装置	1) 最大荷重	動的±10.0ton	動的±10.0ton	動的±5.0ton	動的±5.0ton
	2) 最大ストローク	±50mm	±50mm	±50mm	±3mm
	3) ロードセル	±10.0ton 精度 1.0%F.S	±10.0ton 精度 0.5%F.S	±5.0ton 精度 0.5%F.S	±5.0ton 精度 0.5%F.S
	4) 制御方式	荷重、ひずみ、ストローク	荷重、ひずみ、ストローク	荷重、ひずみ	荷重、ひずみ
	5) 制御波形	サイン波、ランプ波、矩形波	サイン波、ランプ波、矩形波	ランプ波	ランプ波
	6) 負荷速度	10 ⁻⁴ Hz～10Hz	10 ⁻⁴ Hz～10Hz	10 ⁻⁵ Hz～10 ⁻⁴ Hz	10 ⁻⁵ Hz～10 ⁻⁴ Hz
	7) 試験片タイプ	ボタンタイプ	ボタンタイプ	ボタンタイプ	ネジタイプ
ひずみ測定装置	1) 型式	石英棒押し当て方式	アームショルダー方式 石英棒押し当て方式	石英棒押し当て方式	石英棒押し当て方式
	2) 測定範囲	±1.0mm 精度 1%F.S	±1.0mm 精度 1%F.S ±1.0mm 精度 1%F.S	±0.5mm 精度 1%F.S	±1.0mm 精度 1%F.S
	3) 検出器	ひずみゲージ、LVDT	LVDT	ひずみゲージ	ひずみゲージ
加熱装置	1) 型式	高周波誘導加熱方式	半割型管状電気炉	半割型管状電気炉	半割型管状電気炉
	2) 最大出力	6～10kW	4.5kW	5kW	2.4kW
	3) 制御温度範囲	200°C～800°C	300°C～900°C	300°C～800°C	400°C～800°C
	4) 制御方式	PID制御	PID制御	PID制御	PID制御
試験機数		5基	4基	2基	4基
					2基



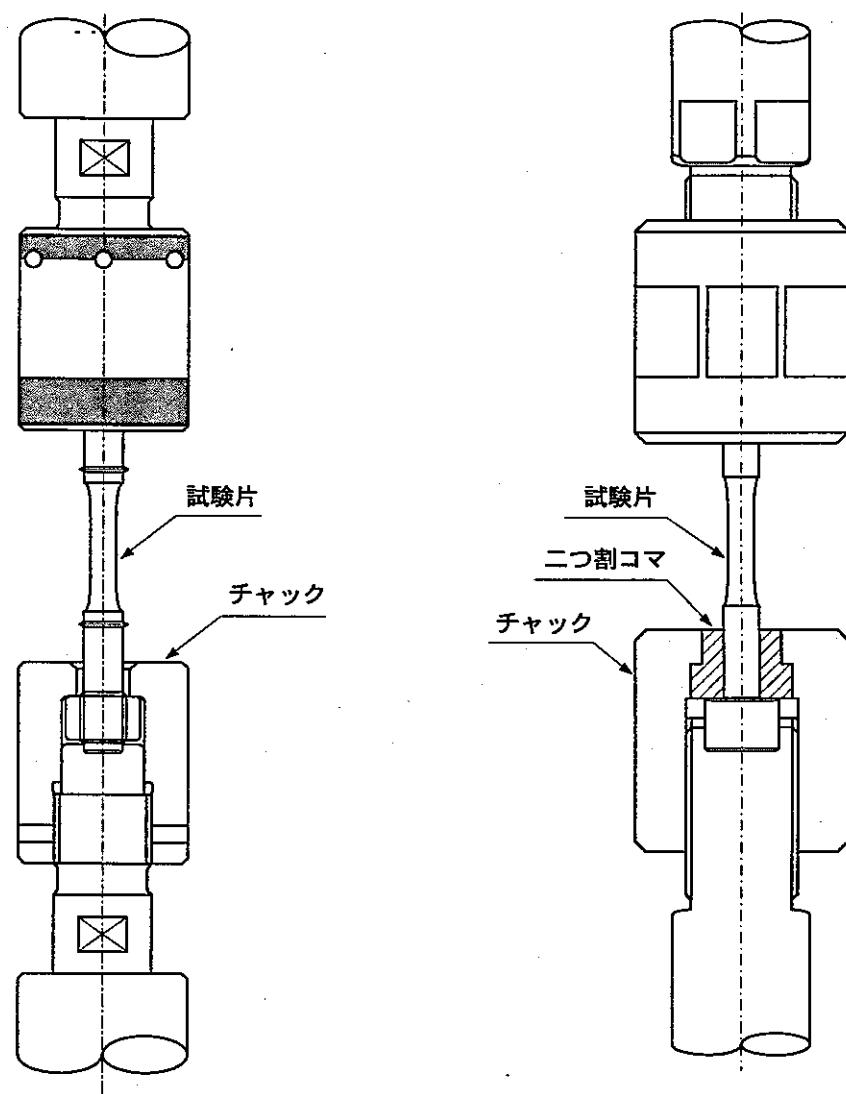
Appendix2.4-2 電気油圧サーボ制御方式疲労試験装置の構成図



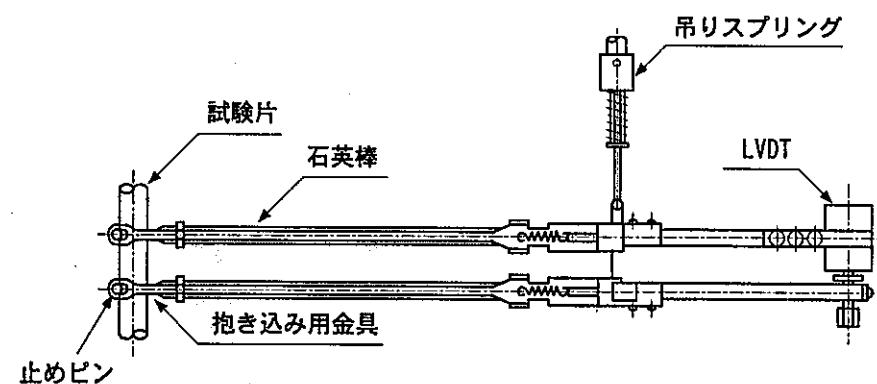
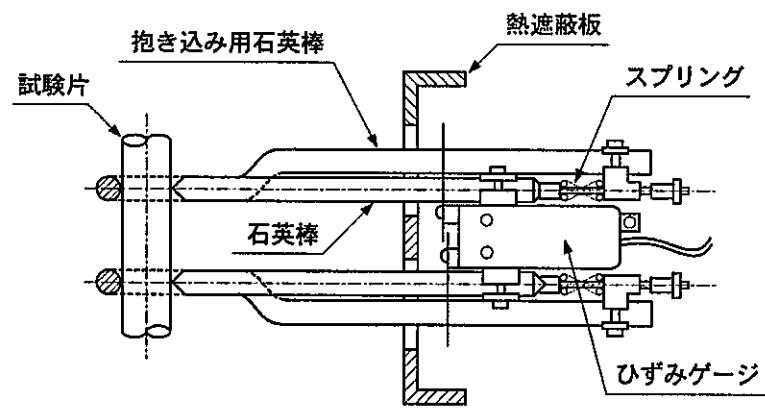
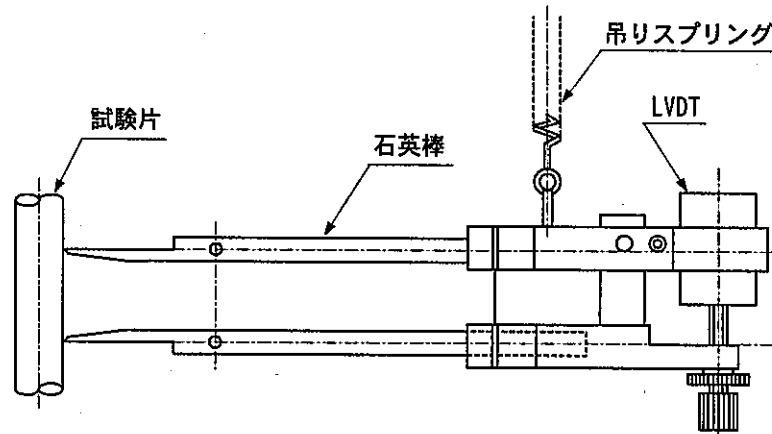
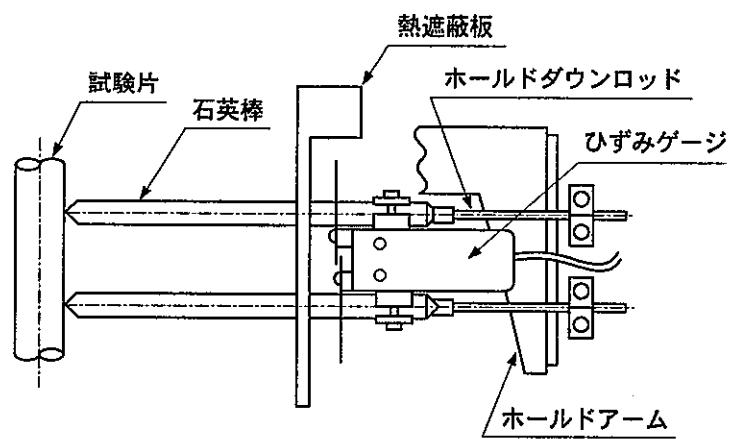
Appendix2. 4-3 電気サーボモータ制御方式疲労試験装置の構成図



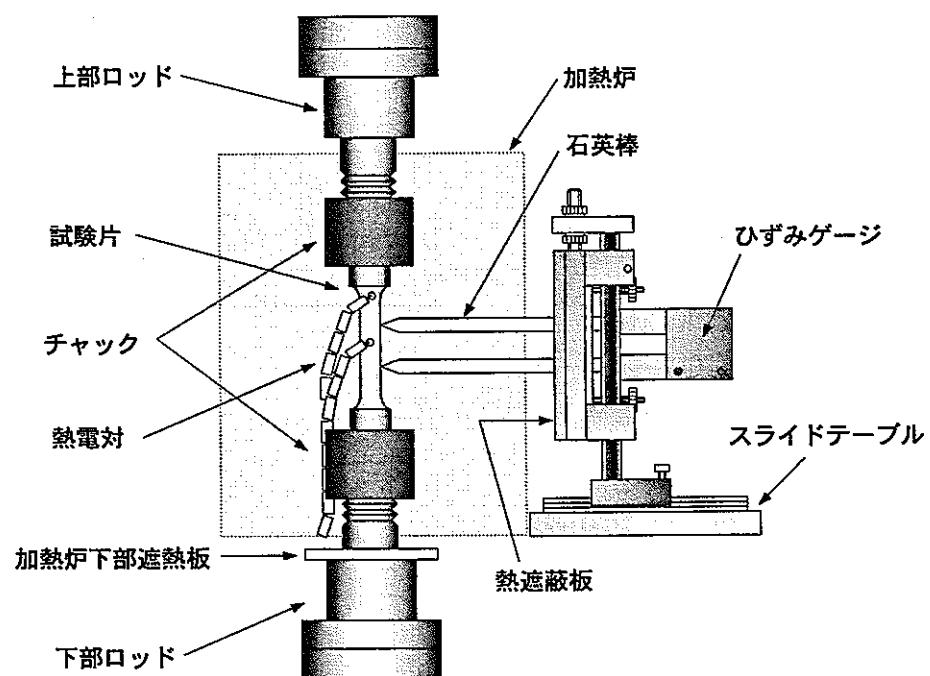
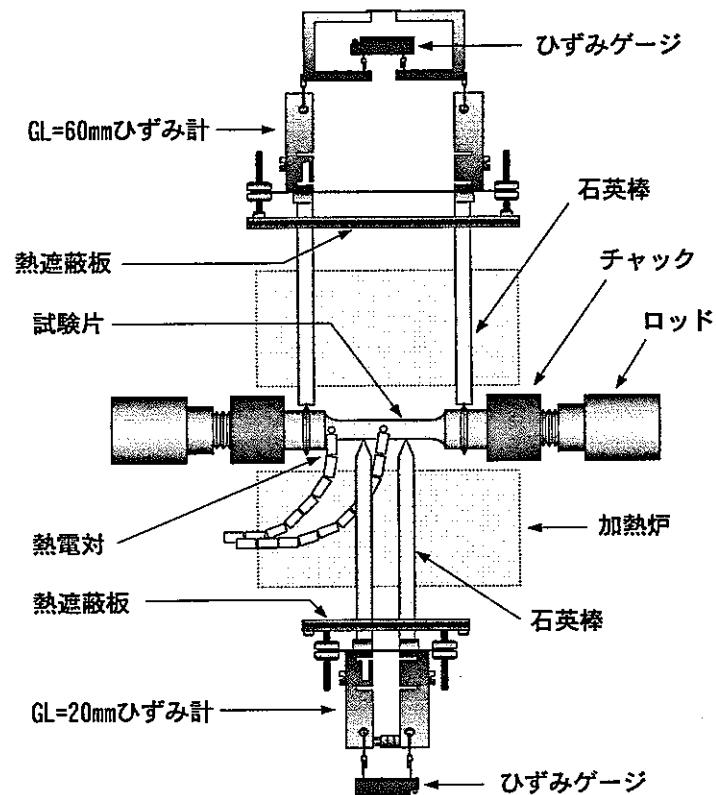
Appendix2.4-4 疲労試験片つかみ部の外観図
(油圧サーボ式)



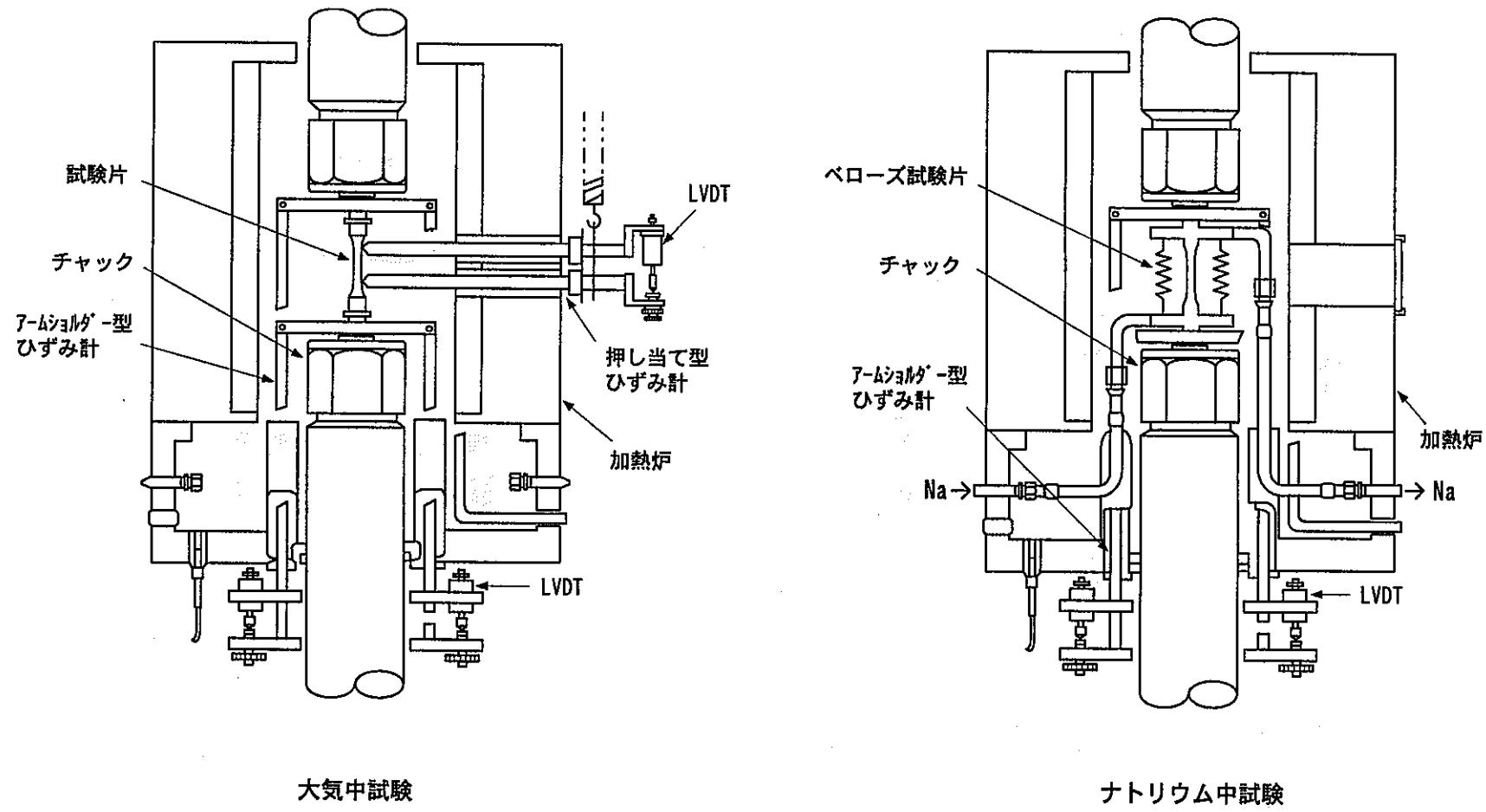
Appendix2.4-5 長時間クリープ疲労試験片つかみ部の外観図
(電気サーボモータ式)



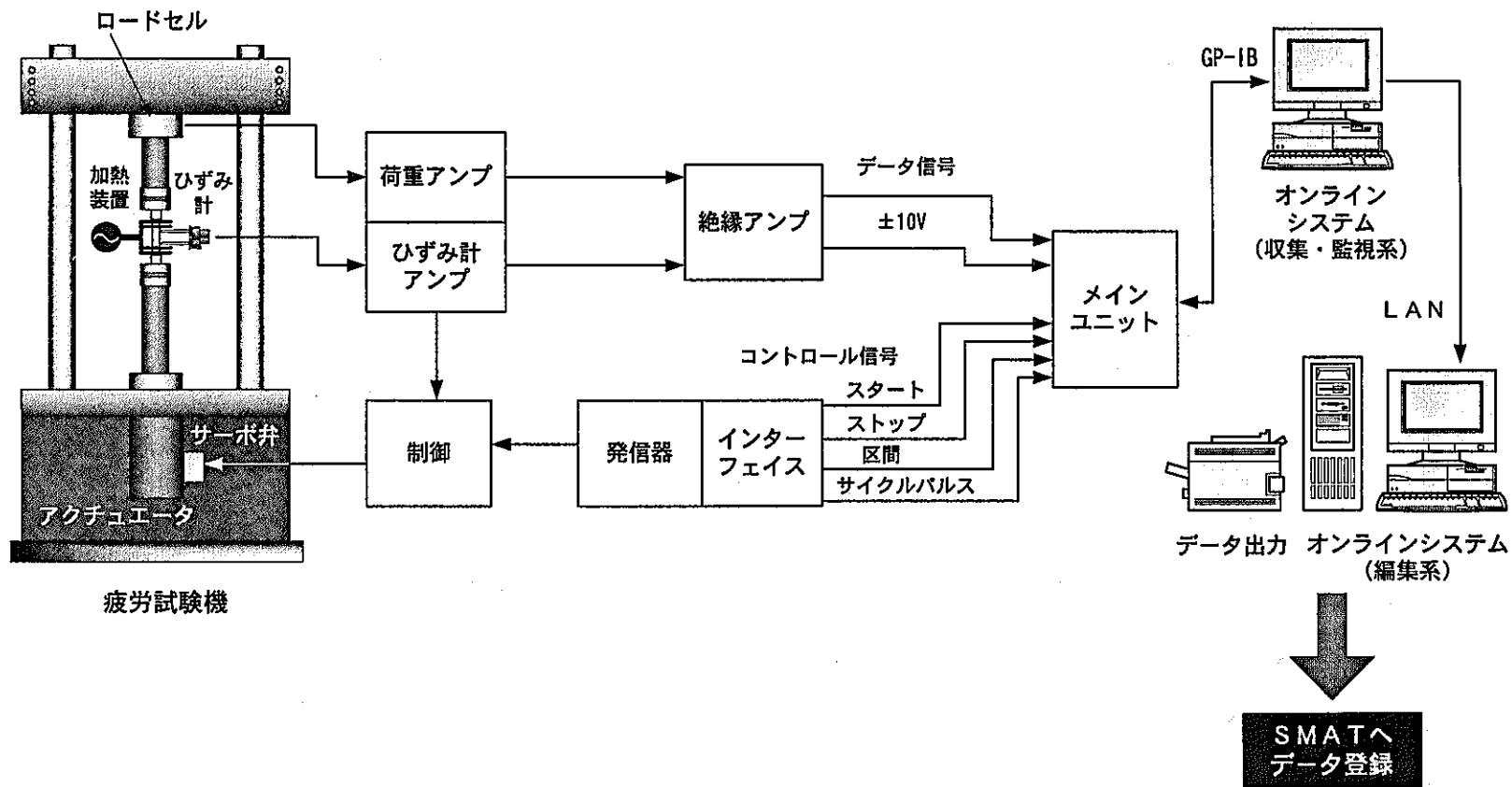
Appendix2.4-6 疲労試験用ひずみ計の外観図
(油圧サーボ式)



Appendix2.4-7 疲労試験用ひずみ計の外観図
(電気サーボモータ式)



Appendix2. 4-8 ナトリウム中疲労試験用ひずみ計の外観図
(油圧サー式)



Appendix2.4-9 疲労系オンラインデータ収集システム

Appendix2.4-10 ワークコイルの製作及び調整方法

大気中疲労試験において試験片を高温に加熱保持する方法の一つに、高周波誘導加熱方式がある。この場合の加熱用ワークコイルは試験片平行部を所定温度に均一加熱保持するためにコイル巻き数とコイル間隔等を調整し製作しなければならない。ワークコイルの製作に際しては、

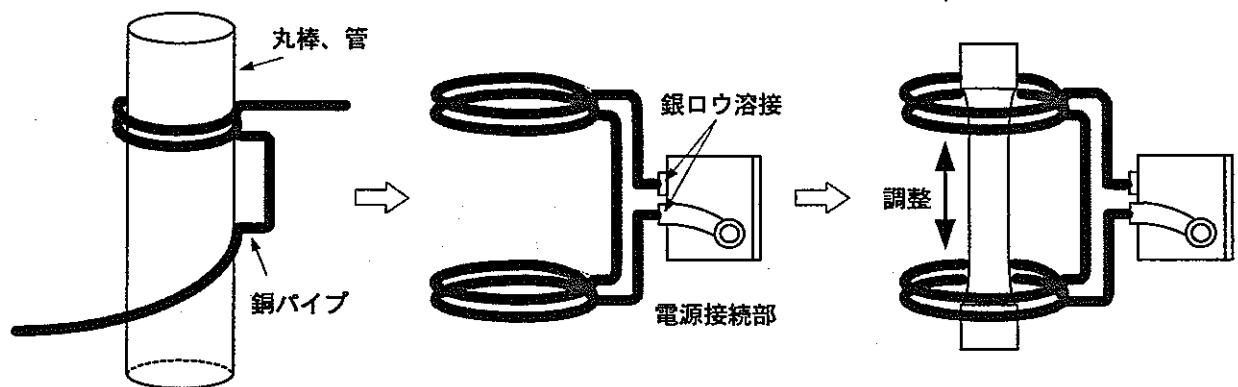
- ・ 試験材の熱伝導率や試験装置により、試験片平行部の温度分布特性が異なること
〔一般に高周波は熱伝導率の低い材料（ステンレス鋼等）、加熱炉は高い材料（炭素鋼、低合金鋼等）に用いる。〕
- ・ ワークコイルの内径や使用している銅パイプの径、巻き数、巻き方向により温度分布特性が変化すること
〔コイル内径を小さく、パイプの径を大きく、巻き数を多くすることによって、コイル内の磁力線密度が高くなる。また、巻き方向が上下同じ方向の場合は、試験片中央部の温度が高くなり、上下逆方向の場合は、低くなる。〕

を考慮する必要があり、以下の手順でワークコイルを製作する（付図1参照）。

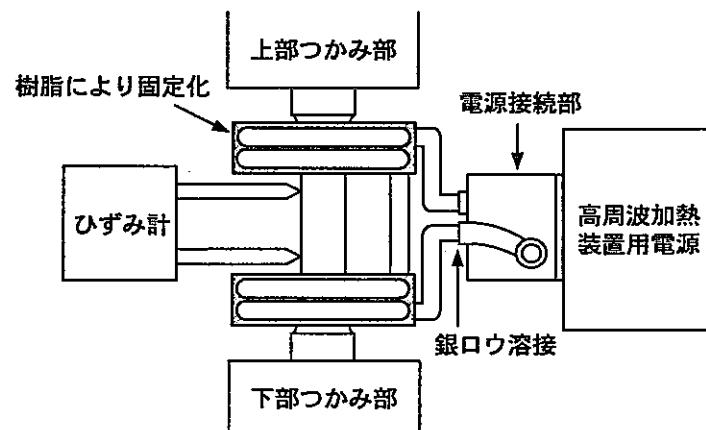
- ①銅パイプ（ $\phi 4, 5, 6; t=1$ ）を丸棒又は管等に巻き付け、コイル形状に製作する。
- ②銅パイプの入口、出口を電源接続部に銀口ウロ接する。
- ③冷却水の通水を確認後、ワークコイル形状を調整し温度分布を均一にする。

ワークコイル取り付け状態(a)は、上下つかみ部間が50mm程度の狭い試験装置において使用するとよい。また、樹脂によりワークコイルを固定すると、試験片脱着時等の接触による変形を防ぎ安定したコイル形状を維持できる。

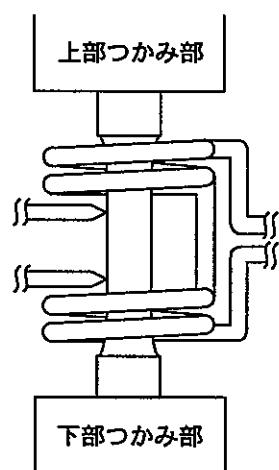
(b), (c)は、上下つかみ部間にスペースがある試験装置において使用するとよい。通常は(b)コイルを使用し、試験片平行部の真ん中の温度が低い場合及び700~900°Cの試験温度の場合は、(c)コイルを使用するとよい（付図2参照）。



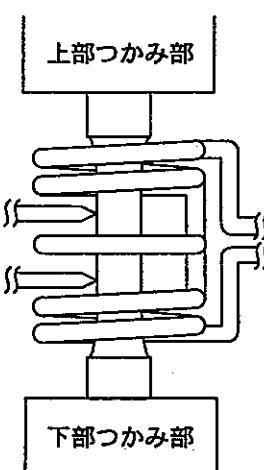
付図1 ワークコイル製作例



(a)



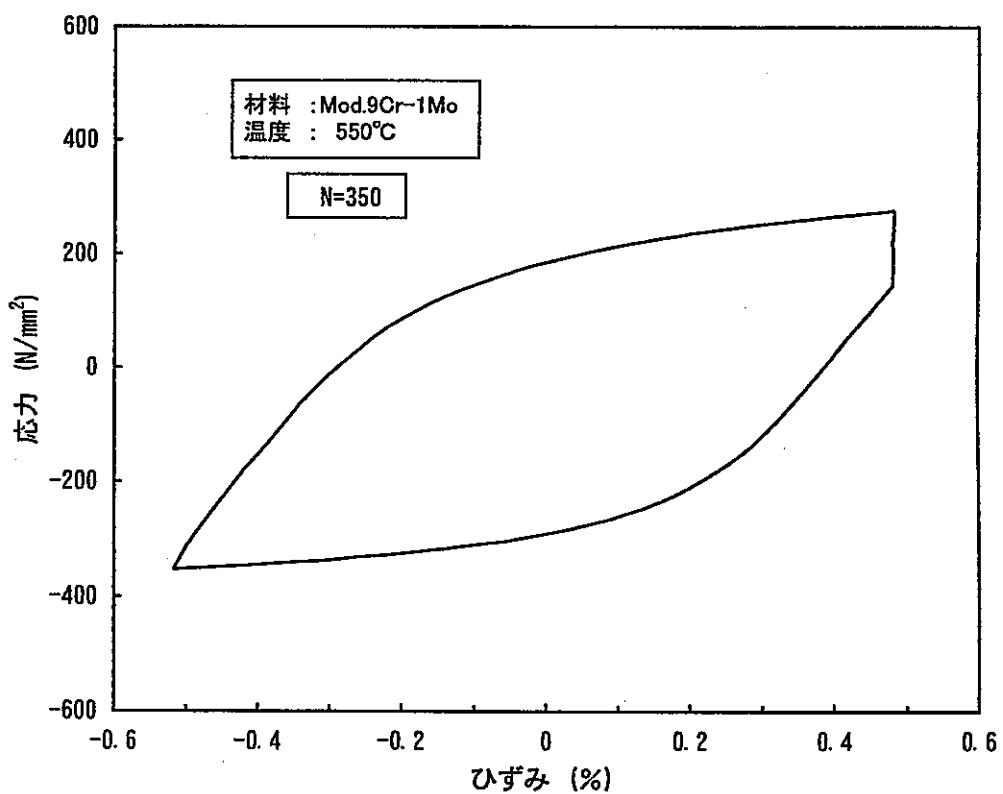
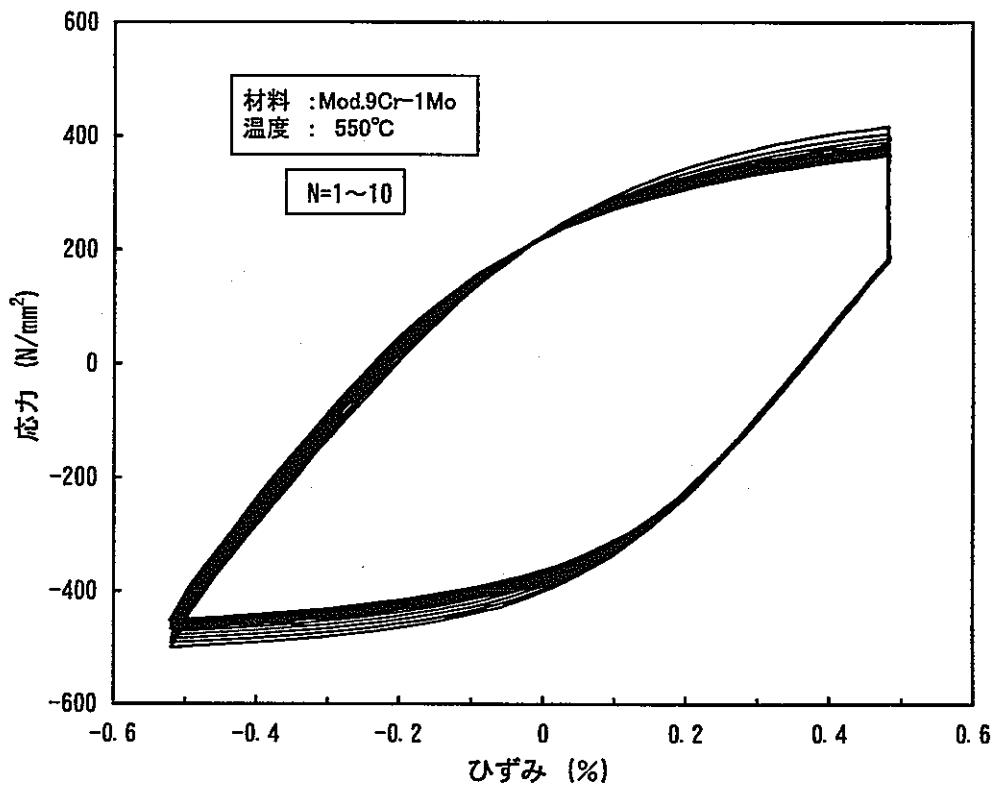
(b)



(c)

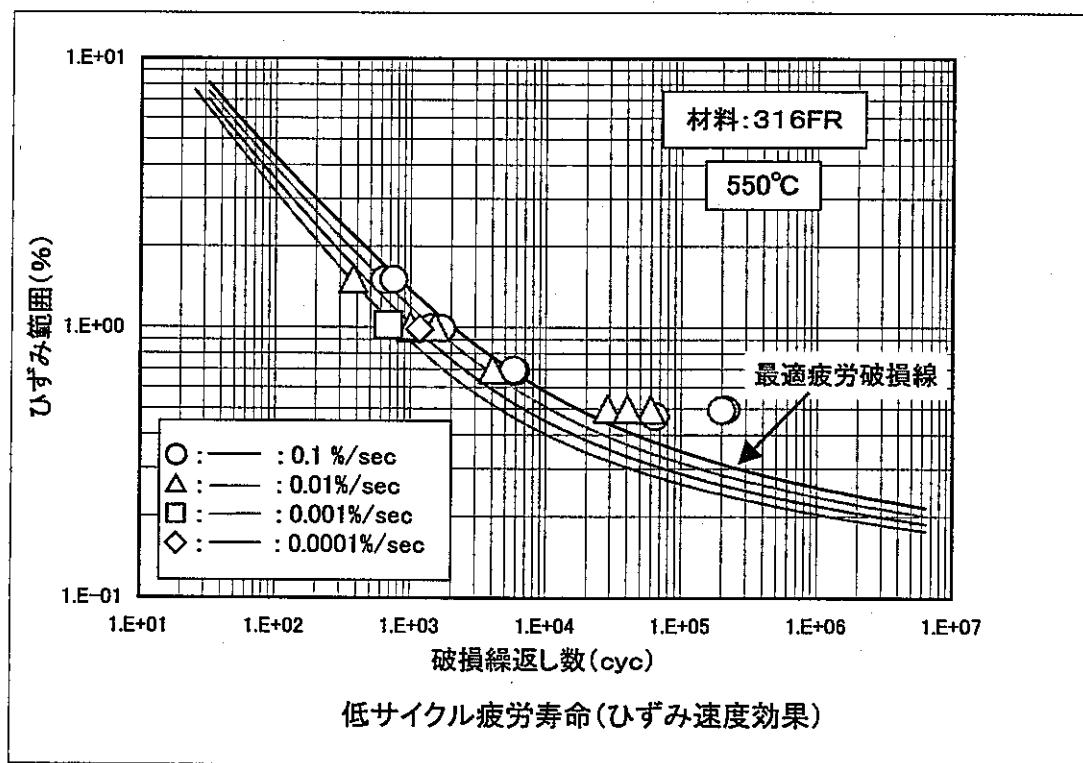
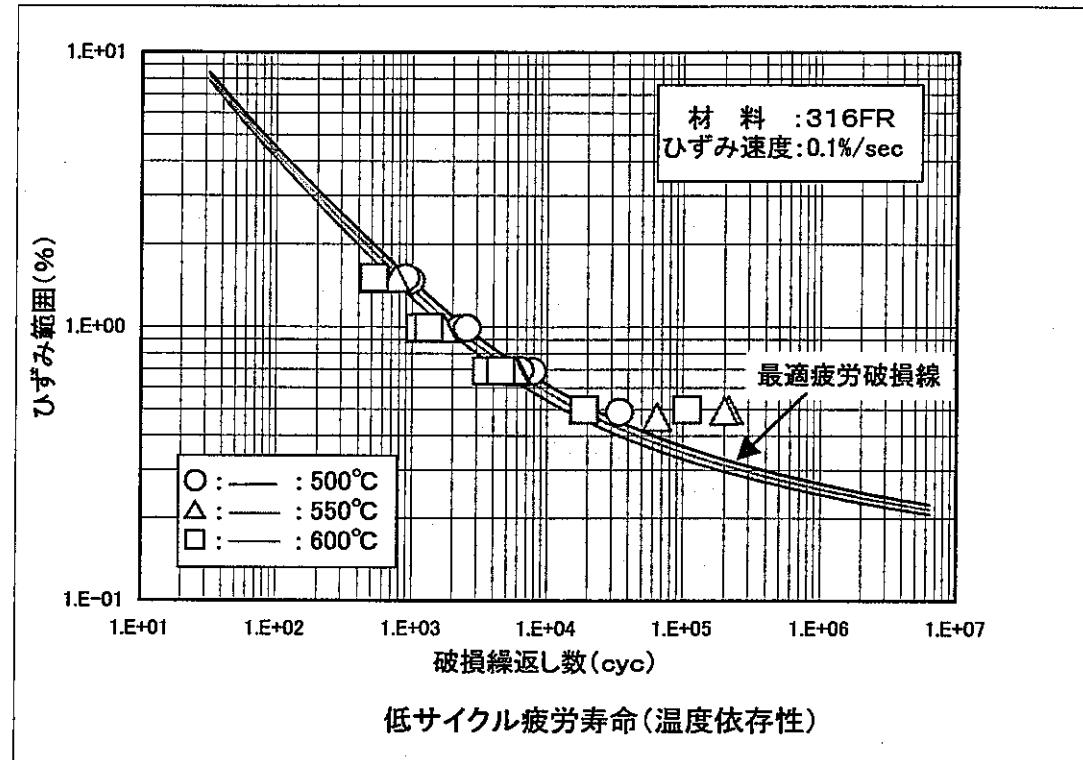
付図2 ワークコイル取り付け状態

Appendix2.4-11 FBR金属材料試験データシート(疲労)

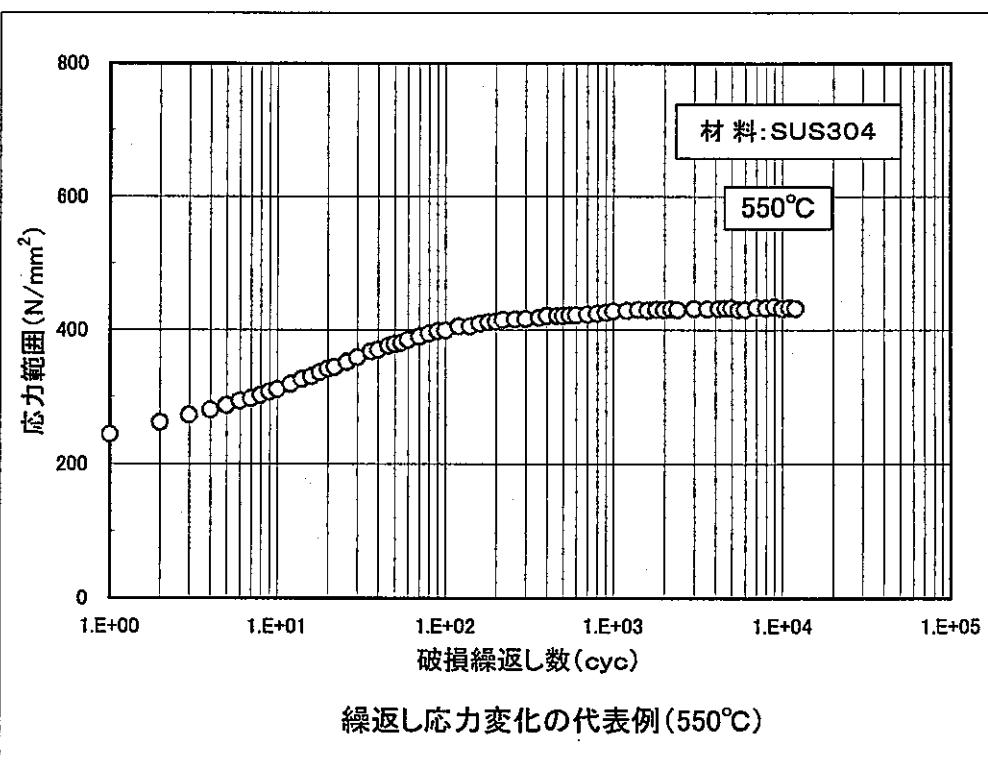
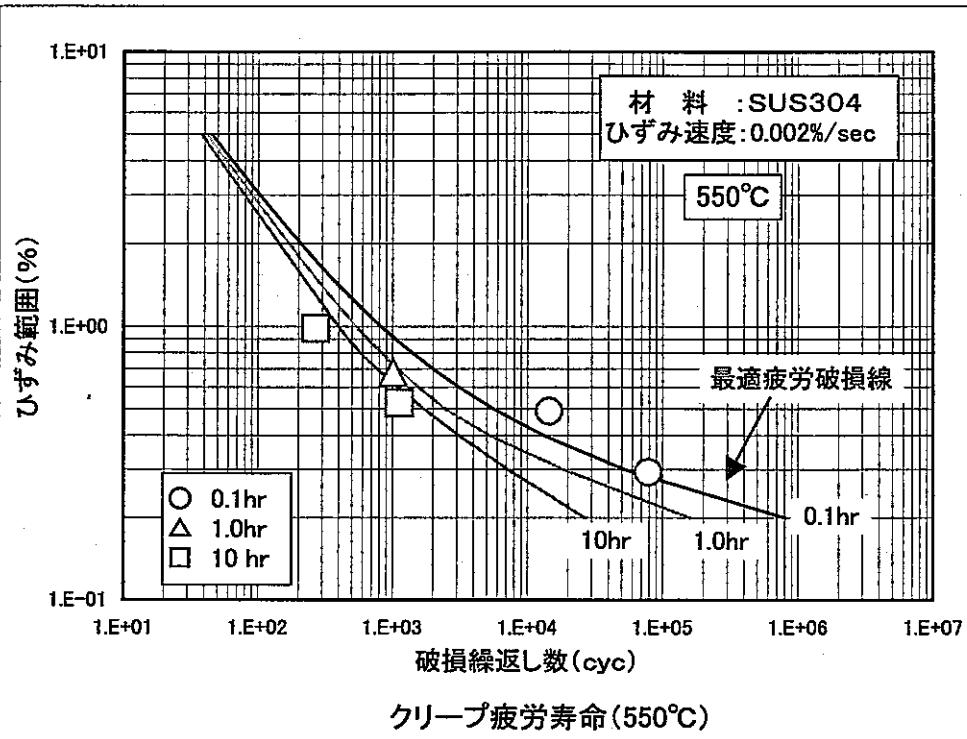


Appendix2. 4-12 ヒステリシスループの代表例

Appendix 2.4-13 低サイクル疲労試験データ



Appendix 2.4-14 長時間クリープ疲労試験データ



Appendix2.4-15 ナトリウム中疲労試験におけるひずみ較正方法

ナトリウム中における構造材料の疲労強度を評価するためには、アーム型ひずみ計 (Appendix 2.4-8) で測定したつば間変位から試験片平行部のひずみを算定することが必要となる。同形状の試験片を用いた大気中試験では、アーム型ひずみ計と押し当て型ひずみ計により、つば間変位と試験片平行部のひずみを併せて測定する。当然、ひずみの制御はアーム型ひずみ計により行う。この結果を用いて大気中とナトリウム中とで材料の応力-ひずみ挙動はほとんど変わらないこととし、以下の方法でナトリウム中でのひずみの較正を行う。

- (1) つば間の総変位 ΔLT は、つば間の平行部及び平行部以外のそれぞれの全変位 ΔLG 、 ΔLR によって次式のように表せる（付図1参照）。

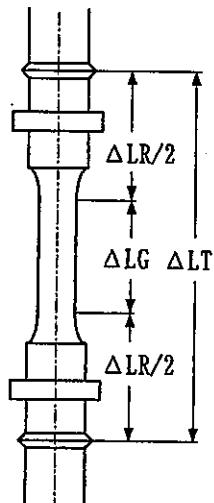
$$\Delta LT_{Na} = \Delta LG_{Na} + \Delta LR_{Na}$$

$$\Delta LT_{Air} = \Delta LG_{Air} + \Delta LR_{Air}$$

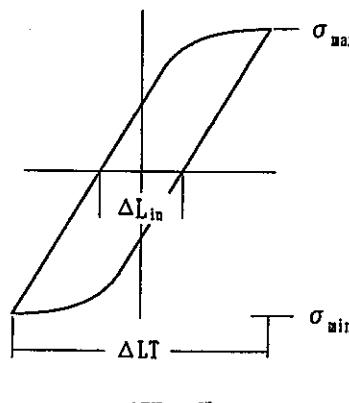
ここで、 Na 及び Air はそれぞれナトリウム中及び大気中での値を示す。

- (2) 試験片材料、温度及び負荷条件が同一であれば、試験材の履歴は別として単に試験環境が、大気中とナトリウム中とで異なるだけならば、その応力-ひずみ挙動はほぼ同等であるため、一定のつば間変位 ΔLT の繰り返しに対して、ナトリウム中と大気中の ΔLG と ΔLR は、それぞれほぼ同じ値にあると考えられる。 $(\Delta LG_{Na} = \Delta LG_{Air}, \Delta LR_{Na} = \Delta LR_{Air})$
- (3) これにより、大気中試験から得られた ΔLT_{Air} と ΔLG_{Air} の関係に対し、ナトリウム中試験において破損回数 N_f の1/2回での ΔLT_{Na} を代入すれば ΔLG_{Na} が求まる。
- (4) 平行部の非弾性変位 ΔLG_{in} は、全ひずみの場合に準じてつば間の非弾性変位 ΔLin を用いて、(3)項同様大気中の $\Delta Lin - \Delta LG_{in}$ の関係に代入して求める。

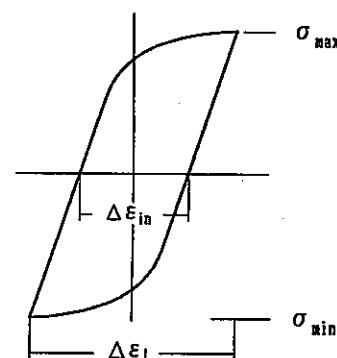
付図3に参考として、大気中試験により求められたひずみ較正曲線を示す。



付図1 試験片



ツバ間ひずみ計



平行部押し当てひずみ計

付図2 応力ひずみ波形図

付図3 Mod. 9Cr-1Mo鋼のひずみ較正曲線（例）

