



JAEA-Testing

2023-004

DOI:10.11484/jaea-testing-2023-004

FBR金属材料試験実施要領書 (2023年度改訂版)

FBR Metallic Materials Test Manual
(2023 Revised Edition)

今川 裕也 豊田 晃大 鬼澤 高志 加藤 章一

Yuya IMAGAWA, Kodai TOYOTA, Takashi ONIZAWA and Shoichi KATO

高速炉・新型炉研究開発部門

大洗研究所

高速炉サイクル研究開発センター

高速炉基盤技術開発部

Fast Reactor Fundamental Technology Development Department

Fast Reactor Cycle System Research and Development Center

Oarai Research and Development Institute

Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

March 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

FBR 金属材料試験実施要領書(2023 年度改訂版)

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター
高速炉基盤技術開発部

今川 裕也、豊田 晃大、鬼澤 高志、加藤 章一

(2023 年 11 月 30 日受理)

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、アルゴン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。本報は、1977 年に発行された「FBR 金属材料試験実施要領書[PNC TN241 77-03]」および 2001 年に発行された「FBR 金属材料試験実施要領書(改訂版) (マニュアル) [JNC TN9520 2001-001]」に日本産業規格(JIS)における試験法の改訂を反映するとともに、国内学会における材料試験法標準である日本機械学会(JSME)の推奨常温/高温引張試験方法や日本材料学会(JSMS)の高温低サイクル疲労試験法標準も参考にしながら作成した。

FBR Metallic Materials Test Manual (2023 Revised Edition)

Yuya IMAGAWA, Kodai TOYOTA, Takashi ONIZAWA and Shoichi KATO

Fast Reactor Fundamental Technology Development Department
Fast Reactor Cycle System Research and Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 30, 2023)

This manual describes the methods for conducting material tests in air, argon gas, and sodium, and for organizing the data obtained, as a part of the development of high-temperature structural design technology for fast reactors.

This manual reflects the revision of test methods in Japanese Industrial Standards (JIS) to the “FBR Metallic Materials Test Manual, PNC TN241 77-03” published in 1977 and the “FBR Metallic Materials Test Manual (Revised Edition), JNC TN9520 2001-001” published in 2001. Also, it was written with reference to the recommended room temperature / elevated temperature tensile test method by the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) and the test standard for the elevated-temperature low-cycle fatigue test method by the Society of Materials Science, Japan (JSMS), which are the standard for material test methods in the domestic academic society.

Keywords: Structural Material, Fuel Material, Tensile Test, Creep Test, Relaxation Test, Fatigue Test

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)	9
2.2.1 適用範囲	9
2.2.2 用語の定義	9
2.2.3 試験片	9
2.2.4 試験装置	10
2.2.5 試験方法	10
2.2.6 試験結果の報告	13
2.2.7 試験結果のデータベース化	13
2.2.8 引用規格	13
2.3 リラクセーション試験	15
2.3.1 適用範囲	15
2.3.2 用語の説明	15
2.3.3 試験片	15
2.3.4 試験装置	15
2.3.5 試験方法	17
2.3.6 試験結果の報告	18
2.3.7 試験結果のデータベース化	19
2.3.8 引用規格	19
2.4 疲労試験・クリープ疲労試験	20
2.4.1 適用範囲	20
2.4.2 用語の説明	20
2.4.3 試験片	20
2.4.4 試験装置	21
2.4.5 試験方法	23
2.4.6 試験結果の報告	26

2.4.7	試験結果のデータベース化	27
2.4.8	引用規格	27
2.5	内圧封入型クリープ試験(含クリープ破断試験).....	28
2.5.1	適用範囲	28
2.5.2	適用規格及び用語の定義	28
2.5.3	試験片	28
2.5.4	試験装置	28
2.5.5	試験方法	29
2.5.6	試験結果の報告	31
2.5.7	試験結果のデータベース化	32
2.5.8	引用規格	32
	謝辞	33
	参考文献	33
	付録	65

Contents

1. Introduction	1
2. Material testing procedures	2
2.1 Tensile test	2
2.1.1 Scope of application	2
2.1.2 Definition of terms	2
2.1.3 Specimens	2
2.1.4 Test equipment	3
2.1.5 Test method	4
2.1.6 Reporting test results	7
2.1.7 Creating a database of test results	7
2.1.8 Reference standards	8
2.2 Creep test (including creep rupture test)	9
2.2.1 Scope of application	9
2.2.2 Definition of terms	9
2.2.3 Specimens	9
2.2.4 Test equipment	10
2.2.5 Test method	10
2.2.6 Reporting test results	13
2.2.7 Creating a database of test results	13
2.2.8 Reference standards	13
2.3 Relaxation test	15
2.3.1 Scope of application	15
2.3.2 Definition of terms	15
2.3.3 Specimens	15
2.3.4 Test equipment	15
2.3.5 Test method	17
2.3.6 Reporting test results	18
2.3.7 Creating a database of test results	19
2.3.8 Reference standards	19
2.4 Fatigue test & creep-fatigue test	20
2.4.1 Scope of application	20
2.4.2 Definition of terms	20
2.4.3 Specimens	20
2.4.4 Test equipment	21
2.4.5 Test method	23
2.4.6 Reporting test results	26

2.4.7 Creating a database of test results	27
2.4.8 Reference standards	27
2.5 Internal pressure creep test (including internal pressure creep rupture test)	28
2.5.1 Scope of application	28
2.5.2 Applied standards and definition of terms	28
2.5.3 Specimens	28
2.5.4 Test equipment	28
2.5.5 Test method	29
2.5.6 Reporting test results	31
2.5.7 Creating a database of test results	32
2.5.8 Reference standards	32
Acknowledgements	33
References	33
Appendix	65

表リスト

表 2.1-1	引張試験に関する用語の定義	34
表 2.1-2	引張試験での試験温度の目標範囲	36
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	36
表 2.2-2	クリープ試験及びクリープ破断試験での試験温度の目標範囲	38
表 2.2-3	クリープデータ測定間隔(推奨値)	38
表 2.3-1	リラクセーション試験に関する用語の定義	39
表 2.4-1	疲労試験・クリープ疲労試験に関する用語の定義	40
表 2.5-1	内圧封入型クリープ試験に関する用語の定義	41

付図リスト

付図 2.1-1	荷重－伸び線図の一般例	42
付図 2.2-1	クリープ曲線の模式的説明	42
付図 2.3-1	リラクセーション曲線の模式的説明	43
付図 2.4-1	応力ひずみ波形図の模式的説明	43

List of tables

Table 2.1-1	Definition of terms relating to tensile tests	34
Table 2.1-2	Target range of test temperatures in tensile tests	36
Table 2.2-1	Definition of terms relating to creep and creep rupture tests	36
Table 2.2-2	Target range of test temperatures in creep and creep rupture tests	38
Table 2.2-3	Creep data measurement interval (recommended)	38
Table 2.3-1	Definition of terms relating to relaxation tests	39
Table 2.4-1	Definition of terms relating to fatigue and creep-fatigue tests	40
Table 2.5-1	Definition of terms relating to internal pressure creep tests	41

List of appendix figures

Appended Fig. 2.1-1	General example of load-elongation diagram	42
Appended Fig. 2.2-1	Schematic description of the creep curve	42
Appended Fig. 2.3-1	Schematic description of the relaxation curve	43
Appended Fig. 2.4-1	Schematic description of the stress-strain curve	43

図リスト

図 2.1-1	丸棒型、板状及び弧状型試験片外観図	44
図 2.1-2	微小試験片及びリング型試験片外観図	45
図 2.1-3	被覆管試験片外観図	45
図 2.1-4	試験片平行部加工要領	46
図 2.1-5	特殊引張試験片の製作例	46
図 2.1-6	リング型試験片用治具及び微小試験片用治具の構造	47
図 2.1-7	被覆管試験片固定用治具の構造	47
図 2.1-8	各種試験片の寸法測定位置の例	48
図 2.1-9	熱電対先端部の形状	49
図 2.1-10	放射熱による計測誤差の防止	49
図 2.1-11	破断後の寸法測定箇所	49
図 2.1-12	破断位置の明示方法	50
図 2.2-1	クリープ試験片外観図	51
図 2.2-2	段階負荷方法	52
図 2.2-3	クリープ曲線のひずみ補正処理	52
図 2.3-1	リラクセーション試験片外観図	53
図 2.3-2	二重風防による試験精度の向上例	53
図 2.3-3	リラクセーション挙動の比較	54
図 2.4-1	大気中疲労試験片外観図(ボタンタイプ)	55
図 2.4-2	大気中疲労試験片外観図(ネジタイプ)	55
図 2.4-3	高サイクル疲労試験片外観図	56
図 2.4-4	ナトリウム中疲労試験片外観図	57
図 2.4-5	特殊疲労試験片の製作例	58
図 2.4-6	押し当て型ひずみ計の例	59
図 2.4-7	アームショルダー型ひずみ計の例	60
図 2.4-8	レーザー変位計(非接触型ひずみ計)取り付けの例	60
図 2.4-9	押し当て型ひずみ計を用いたキャリブレーションの例	61
図 2.4-10	疲労試験片寸法測定箇所	61
図 2.4-11	温度制御の方法	62
図 2.4-12	ナトリウム中疲労試験の温度制御方法	62
図 2.4-13	破損繰り返し数の求め方	63
図 2.4-14	破損位置の明示方法(母材及び溶接金属)	63
図 2.5-1	内圧クリープ試験片外観図($\phi 8.5 \times 0.5t$ の例)	64
図 2.5-2	試験片の寸法測定箇所の概略図($\phi 8.5 \times 0.5t$ の例)	64

List of figures

Fig. 2.1-1	External view of round-bar, plate, and arc-shaped specimens	44
Fig. 2.1-2	External view of miniature specimen and ring specimen	45
Fig. 2.1-3	External view of cladding tube specimen	45
Fig. 2.1-4	Machining procedure for specimen parallels	46
Fig. 2.1-5	Examples of special specimen production	46
Fig. 2.1-6	Structure of jigs for ring specimen and miniature specimen	47
Fig. 2.1-7	Structure of jig for fixing cladding tube specimen	47
Fig. 2.1-8	Examples of measurement positions for various specimens	48
Fig. 2.1-9	Shape of thermocouple tip	49
Fig. 2.1-10	Prevention of measurement error due to radiant heat	49
Fig. 2.1-11	Measuring points after specimen rupture	49
Fig. 2.1-12	Method of indicating the specimen rupture position	50
Fig. 2.2-1	External view of creep specimens	51
Fig. 2.2-2	Gradual load method	52
Fig. 2.2-3	Strain correction process for creep curves	52
Fig. 2.3-1	External view of relaxation specimen	53
Fig. 2.3-2	Example of improved test accuracy with double windshield	53
Fig. 2.3-3	Comparison of relaxation behavior	54
Fig. 2.4-1	External view of fatigue specimen for in-air testing (button type)	55
Fig. 2.4-2	External view of fatigue specimen for in-air testing (screw type)	55
Fig. 2.4-3	External view of high-cycle fatigue specimen	56
Fig. 2.4-4	External view of fatigue specimen for in-sodium testing	57
Fig. 2.4-5	Example of special fatigue specimen production	58
Fig. 2.4-6	Examples of push type strain gauge	59
Fig. 2.4-7	Example of arm shoulder type strain gauge	60
Fig. 2.4-8	Example of laser extensometer (non-contact strain gauge)	60
Fig. 2.4-9	Example of calibration using a push type strain gauge	61
Fig. 2.4-10	Measuring points of fatigue specimen	61
Fig. 2.4-11	Temperature control method	62
Fig. 2.4-12	Temperature control method for fatigue testing in sodium	62
Fig. 2.4-13	How to determine the number of cycles to failure	63
Fig. 2.4-14	Method of indicating the specimen damaged position (base metal and weld metal)	63
Fig. 2.5-1	External view of internal pressure creep specimen (example of $\phi 8.5 \times 0.5t$ specimen)	64
Fig. 2.5-2	Schematic drawing of specimen measurement points (example of $\phi 8.5 \times 0.5t$ specimen)	64

This is a blank page.

1. はじめに

「FBR 金属材料試験実施要領書」[1]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、1977年に作成された試験実施要領書である。その後、日本産業規格(JIS)における試験法の改訂及び国際単位(SI)系への対応を契機に、2001年に「FBR 金属材料試験実施要領書(改訂版)(マニュアル)」[2]を発行している。

本要領書(2023年度改訂版)は、2001年の改訂版発行後のJISにおける試験法の改訂への対応及び高速炉燃料被覆管の材料特性取得のための試験方法を追加するため、改訂したものである。作成にあたって、本要領書は国内学会における材料試験法標準である日本機械学会(JSME)の材料規格における推奨常温/高温引張試験方法[3]や日本材料学会(JSMS)の高温低サイクル疲労試験法標準[4]も参考にした。

2. 材料試験の実施要領

2.1 引張試験

2.1.1 適用範囲

本項の規定は高速炉用構造材料及び高速炉用燃料被覆管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。

2.1.3 試験片

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 2241 に準じるものとする。標点距離(GL : gauge length)は、以前に発行した試験実施要領書[2]ではツバの内側間を GL としていたが、本要領書では現行の JIS に準拠したツバの頂点間を GL 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溶接継手材料等又は高速炉燃料被覆管を対象とする。

(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 $\phi 10$ を標準とするが、 $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 又は $\phi 12$ のものも用いることができる。試験片平行部の長さは $5D(D : \text{平行部直径})$ 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)そのままの形状を円弧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、高速炉燃料被覆管の場合は標準試験片を採取できないため、周方向の引張特性を取得する際はリング型試験片を、軸方向の引張特性を取得する際は微小試験片又は被覆管を一定の長さに切断した被覆管試験片を用いる。リング型試験片、微小試験片の外観図を図 2.1-2 に、被覆管試験片の例を図 2.1-3 に示す。

標準試験片以外の形状、寸法のものを使用する場合は、試験依頼者と試験実施者間で協議し、合意の上決定する。

(2) 採取位置

試験片軸方向と素材仕上げ方向(ロール : 圧延方向、押し出し方向、主鍛造方向)が平行(L 方向)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(T 方向)、板厚方向に試験片を採取できるものとする。ただし、溶接金属や溶接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 2.1-4 に示す手順を目標とする。平行部外径の公差は目標 ± 0.01 mm 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 $1.6 \mu\text{m}$ 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、エメリー紙(600 番以上)を用いて磨き上げる。

(4) 特殊試験片の製作

図 2.1-5 に狭開先溶接部からの溶接金属及び溶接継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、計測装置等から構成される。

(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 $\pm 1.0\%$ 以内、クロスヘッド速度精度は $\pm 0.1\%$ 以内が望ましい。

(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。リング型試験片は曲げ応力の発生を抑えるため、試験片と治具のクリアランスを 0.1 mm 程度に抑えたハーフマンドレルを中央に持つ上下一対構造のものが望ましい。微小試験片の場合は試験片平行部以外を押さえ板で固定し、鉛直方向のみの力がかかる上下一対構造が望ましい。リング型試験片用治具及び微小試験片用治具の構造を図 2.1-6 に示す。被覆管試験片の場合は精密チャック爪で試験片を固定する。精密チャック爪で試験片を固定する際は、試験片が潰れることを防止するために両端に中子を挿入する。被覆管試験片固定用治具の構造を図 2.1-7 に示す。

つかみ部・治具の材質は、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。

(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。

(4) 加熱装置

加熱装置は電気ヒーター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、 $\phi 0.5$ の R 熱電対(JIS 許容差クラス 2)を標準とする。また、温度制御は PID 調節式とする。

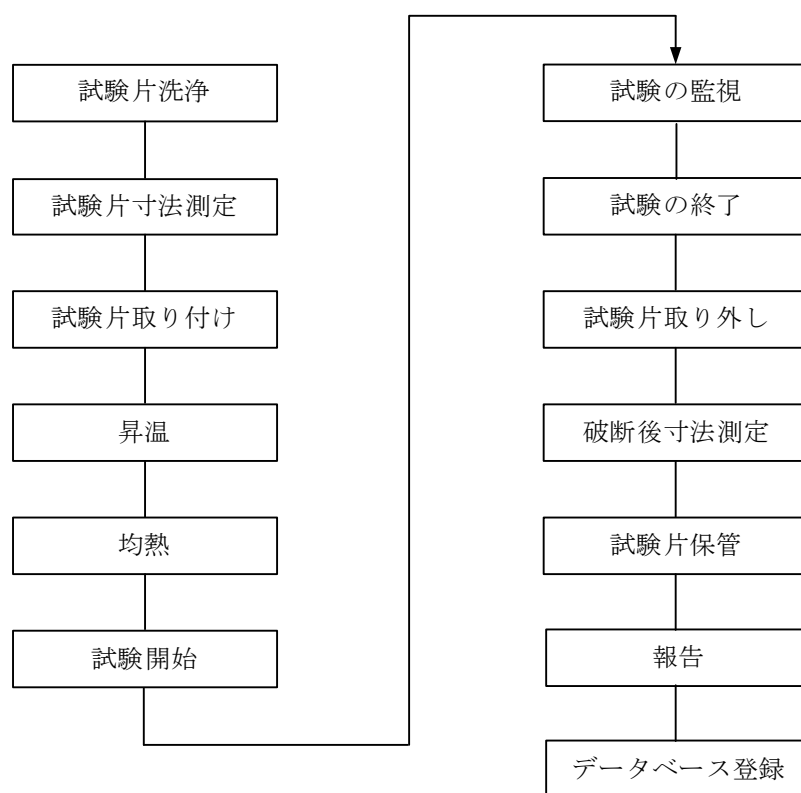
(5) 計測装置

応力、ひずみ及び温度の計測には、専用ソフトウェアを搭載した PC を用いる。
本 PC により温度の時間変化、試験制御、試験の監視、試験データの計測を行う。
計測したデータから各引張特性値を算出する。

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、アセトン、エタノールの順に試験片の超音波洗浄を行う。洗浄後の試験片は乾燥させ、デシケーター等の錆や汚れの付着を防止できる保管容器を用いて保管する。

(2) 試験片寸法測定

試験片の寸法測定は投影機や測定顕微鏡等の寸法測定機器を用いて行う。直径の測定にはマイクロメーター等の測定機器を用いる。なお、測定時には試験片の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平行部の複数箇所で求めた断面積の平均値を用いる。各種試験片の寸法測定位置の例を図 2.1-8 に示す。図中 A, B, C 及び D, E, F は寸法測定位置を表している。

なお、弧状型試験片で厚さ測定をする際は、測定面の先端形状が球になっているものを使用する。

(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らないようにする。

(4) 加熱方法

熱電対を試験片平行部の上、中、下の 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 2.1-9 に示すように球状にすることが望ましい。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 2.1-10 参照)。

試験片の断面積が小さく酸化の影響を受け易いと考えられる、リング型試験片や微小試験片を使用する場合は、試験片の酸化を防止するためアルゴンガスなどの不活性ガスで試験部の雰囲気置換して試験を行うことが望ましい。また、リング型試験片や微小試験片は試験片平行部への熱電対の縛り付けが困難であるため、試験治具に熱電対を固定し、温度の測定に用いる。この場合は、本試験の前に治具の温度と試験片の温度の関係を、温度分布確認試験を実施するなどして把握しておく必要がある。

試験片は、試験温度に達してから試験開始まで約 20 分間均熱保持する。

(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、JIS Z 2241 及び JIS G 0567 が規定する負荷速度を包絡する範囲を適用する。また、リング型試験片や微小試験片など特殊な試験片の場合、引張速度は当事者間で協議する。

負荷速度は室温に以下の①を、室温を超える温度に②の負荷速度を別々に設定しているが、引張特性へのひずみ速度依存性を評価する場合などはこの限りではない。

①室温(10～35℃)における負荷速度は日本機械学会推奨の以下の速度[3]を適用する。試験中、負荷速度は以下の範囲内でできるだけ一定にすること。

降伏応力又は耐力測定までの間は、

$$2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 3.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} (1.2 \%/\text{min} \sim 2.1 \%/\text{min})$$

降伏応力又は耐力測定後、破断までは、

$$3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 8.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} (18 \%/\text{min} \sim 49.98 \%/\text{min})$$

②室温を超える温度領域の負荷速度は日本機械学会推奨の以下の速度[3]を適用する。試験中、負荷速度は以下の範囲内でできるだけ一定にすること。

降伏応力又は耐力測定までの間は、

$$5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 8.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} (0.3 \%/\text{min} \sim 0.4998 \%/\text{min})$$

降伏応力又は耐力測定後、破断までは、

$$6.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 1.68 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} (4.02 \%/\text{min} \sim 10.08 \%/\text{min})$$

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、必ず僅かな初荷重を加えてから試験を行う。

(6) 引張試験データの記録

各引張特性値を求めるために、専用ソフトウェアを搭載した PC で試験データの計測を行う。データのサンプリング間隔は、降伏応力又は耐力測定までの低速域を短時間間隔(0.10～0.20 秒間隔、5～10 Hz 程度)で、降伏応力又は耐力測定後の破断までの高速域を長時間間隔(0.50～1.00 秒間隔、1～2 Hz 程度)でデータ収集を行うことが望ましい。

(7) 破断後寸法測定

破断後の試験片の寸法測定は投影機や測定顕微鏡等の寸法測定機器を用いて、図 2.1-11 に示すように破断した試験片を突き合わせて行う。試験片標点間(GL')の測定は、試験前後ともに試験片に付したポンチマークを目印として同じ面で測定する。ただし、リング型試験片等の標点間距離(GL')の測定が困難な試験片では肩部(F')の距離を測定し、計算により(GL')を算出する場合もある[GL'=F'-(F-GL)]。また、直径又は最小断面積の測定は突き合わせた際に最小となる部位で測定する。この時、丸棒試験片については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。

なお、板状試験片等の丸棒型試験片以外の試験片の最小断面積から求められる絞りは、形状に起因して変形が均一ではないため参考データとする。

(8) 破断位置の特定

図 2.1-12 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)又は母材(BM))を決定する。ただし、境界部(BOND)については異材溶接継手等で明瞭に境界部であることが分かる際に用いることとする。

(9) 試験片保管

寸法測定終了後、試験片を一本ずつ包装し、試験片番号、試験条件等を明記したうえで所定の保管容器にて保管する。

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。

- (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 見かけの縦弾性係数
 - ② 比例限度
 - 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、後に参照しやすいよう試験データベースを作成し、そこに登録することが望ましい。

2.1.8 引用規格

引張試験実施要領を作成するにあたって参考にした JIS を以下に示す。

JIS B 7721:2018	日本産業規格「引張試験機・圧縮試験機 - 力計測系の校正方法及び検証方法」
JIS B 0031:2022	日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状の図示方法」
JIS B 0601:2013	日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-用語, 定義及び表面性状パラメータ」
JIS B 7741:2019	日本産業規格「一軸試験に使用する伸び計システムの校正方法」
JIS C 1602:2015	日本産業規格「熱電対」
JIS G 0202:2013	日本産業規格「鉄鋼用語(試験)」
JIS G 0567:2020	日本産業規格「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」
JIS Z 2241:2023	日本産業規格「金属材料引張試験方法」
JIS Z 3001-1～7	日本産業規格「溶接用語」
JIS Z 3121:2013	日本産業規格「突合せ溶接継手の引張試験方法」
JIS Z 8401:2019	日本産業規格「数値の丸め方」

2.2 クリープ試験(含クリープ破断試験)

2.2.1 適用範囲

本項の規定は高速炉用構造材料及び高速炉用燃料被覆管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。

2.2.3 試験片

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。標点距離(GL : gauge length)は、以前に発行した試験実施要領書[2]ではツバの内側間を GL としていたが、本要領書では現行の JIS に準拠したツバの頂点間を GL 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溶接継手材料等又は高速炉用燃料被覆管を対象とする。

(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 $\phi 10$ を標準とするが、 $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 又は $\phi 12$ のものも用いることができる。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)そのままの形状を円弧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、高速炉燃料被覆管の場合は標準試験片を採取できないため、周方向のクリープ特性を取得する際はリング型試験片を、軸方向のクリープ特性を取得する際は微小試験片を用いる。リング型試験片、微小試験片の外観図を図 2.1-2 に示す。

標準試験片以外の形状、寸法のものを使用する場合は、試験依頼者と試験実施者間で協議し、合意の上決定する。

(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。

本装置は、試験装置本体、伸び測定装置、加熱装置、計測装置等から構成される。

(1) 試験装置本体

外力に対し十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 $\pm 0.5\%$ 以内が望ましい。

(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。リング型試験片、微小試験片の場合は 2.1.4(2)と同様に専用の治具を用いる。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。

(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等にて測定する。

(4) 加熱装置

加熱装置は電気ヒーター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、 $\phi 0.5$ の R 熱電対(JIS 許容差クラス 2)を標準とする。また、温度制御は PID 調節式とする。

(5) 計測装置

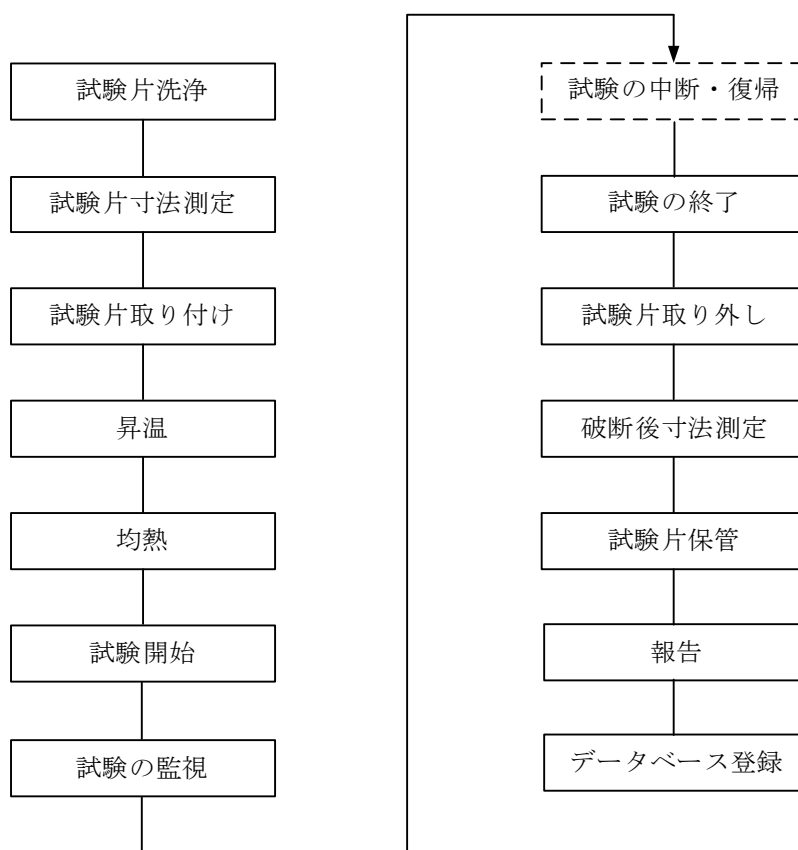
伸び、温度の計測、熱電対の管理(使用時間・使用温度)は、オンラインデータ収集システムにより行う。

オンラインデータ収集システムにより、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熱電対の使用時間や運転状況を監視する。

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。

ただし、原断面積は平行部内の適切な寸法の測定から計算する。試験片の寸法は、標点間距離に沿って 3 ヶ所を測定し、断面積の最小計算値を規定応力に対する試験力の決定に用いる。

(3) 試験片取り付け

第 2.1 項引張試験と同様である。

(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。

リング型試験片や微小試験片を適用する場合の加熱方法は第 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(JIS Z 2271：1 時間以上 24 時間以内)を標準とする。

(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 2.2-2 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

オンラインデータ収集システムで収集する場合は、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) 試験の中断・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又は試験時間達成に至るまでの時間を破断時間又は試験時間とする。ただし、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 2.2-3 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) 破断位置の特定

第 2.1 項引張試験と同様である。

(13) 試験片保管

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。

- (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 昇温時間
 - 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

クリープ試験実施要領を作成するにあたって参考にした JIS を以下に示す。

- JIS B 0031:2022 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状の図示方法」
- JIS B 0601:2013 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-用語、定義及び表面性状パラメータ」
- JIS B 7741:2019 日本産業規格「一軸試験に使用する伸び計システムの校正方法」
- JIS C 1602:2015 日本産業規格「熱電対」

JIS G 0202:2013 日本産業規格「鉄鋼用語(試験)」
JIS Z 2271:2019 日本産業規格「金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法」
JIS Z 3001-1～7 日本産業規格「溶接用語」
JIS Z 8401:2019 日本産業規格「数値の丸め方」

2.3 リラクセーション試験

2.3.1 適用範囲

本項の規定は高速炉用構造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。

2.3.3 試験片

試験において使用する試験片は原則として、JIS Z 2276 に準じる。標点距離(GL : gauge length)は JIS に準拠したツバの頂点間の長さとする。

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溶接継手材料等を対象とする。標点距離はいずれも原則として 100 mm とする。

(1) 試験片形状

試験片は、図 2.3-1 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 $\phi 10$ を標準とするが、 $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 又は $\phi 12$ のものも用いることができる。

リラクセーション試験は、制御対象とするひずみが $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 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 100 mm 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、試験依頼者と試験実施者間で協議し、合意の上決定する。

(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。

(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錘部、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 $\pm 0.5\%$ 以内が望ましい。

(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り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。

(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。

(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、電気ヒーター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、 $\phi 0.5$ の R 熱電対(JIS 許容差クラス 2)を標準とする。また、温度制御は PID 調節式とする。

(5) 計測装置

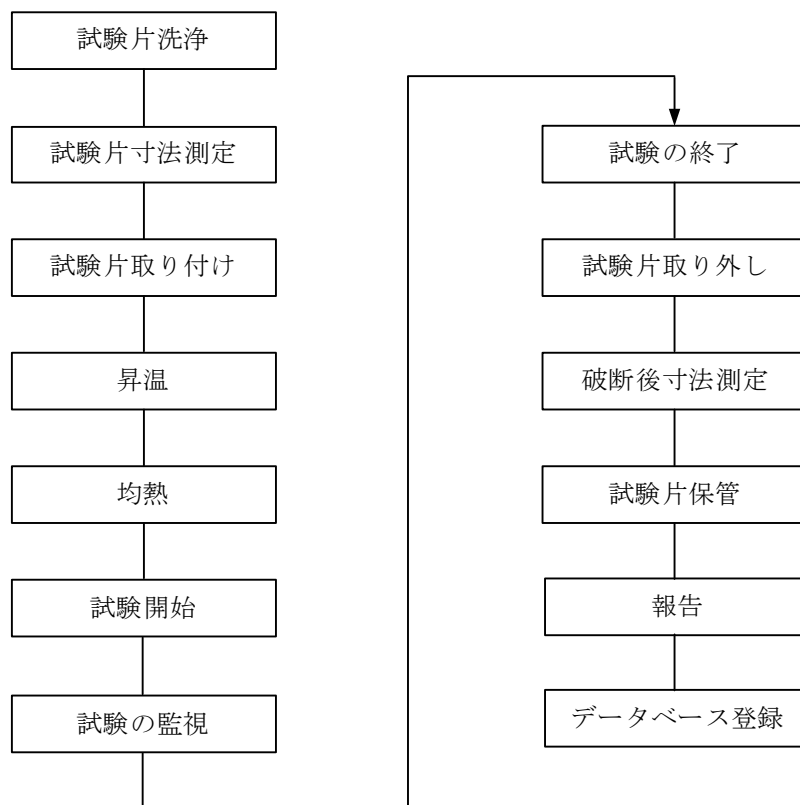
応力、ひずみ、偏差及び温度の計測には、オンラインデータ収集システムを用いる。オンラインデータ収集システムにより応力-ひずみを時系列でサンプリングし、また、試験機の運転監視を行う。

(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 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 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、試験室全体を空調設備により温度管理し、更に試験装置本体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小さくすることが望ましい。これらは図 2.3-2 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

第 2.1 項引張試験と同様である。

(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、その荷重の全部又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、 $\pm 1.5\%$ 以内とする。図 2.3-3

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。

(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、ひずみ及び応力も合わせて記録する。

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。

(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。

- (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又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

リラクセーション試験実施要領を作成するにあたって参考にした JIS を以下に示す。

- JIS B 0031:2022 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状の図示方法」
- JIS B 0601:2013 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-用語, 定義及び表面性状パラメータ」
- JIS C 1602:2015 日本産業規格「熱電対」
- JIS Z 2276:2012 日本産業規格「金属材料の引張りリラクセーション試験方法」
- JIS Z 3001-1～7 日本産業規格「溶接用語」
- JIS Z 8401:2019 日本産業規格「数値の丸め方」

2.4 疲労試験・クリープ疲労試験

2.4.1 適用範囲

本項の規定は高速炉用構造材料の大気中及びナトリウム中での疲労試験・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。

2.4.3 試験片

試験において使用する試験片は原則として、JIS Z 2279 に準じるものとする。

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溶接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、中実丸棒型(平行部直径 $\phi 6$ 、 $\phi 10$)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、試験片の形状は、つかみ部の構造によりボタンタイプ図 2.4-1 とネジタイプ図 2.4-2 になっている。高サイクル疲労試験には、図 2.4-3 に示す試験片形状を用いる。

ナトリウム中の試験片(図 2.4-4)は、流動ナトリウムを対象にした試験片と試験片ベローズ内にナトリウムを封じ込めた充填型疲労試験片に分けられる。両者ともに中実丸棒型(平行部直径 $\phi 10$)を標準とし同一形状の試験片を使用している。ナトリウム流動型は、ナトリウムの流れる配管と流速を得るためのスペーサー、試験片の伸び・縮みを吸収させるベローズを溶接した構造が望ましい。また、ナトリウム充填型試験片は、ベローズ内にナトリウムを封じ込めて試験温度にすることからナトリウムの熱膨張並びに試験片の伸び・縮みを吸収させる構造が望ましい。

なお、ナトリウム環境効果を評価するために、試験片単体(ベローズ、スペーサー等を付けない状態)で大気中試験に供することができる。

(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 2.4-5 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[電子ビーム(EB)溶接又は 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、溶接金属や溶接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又はバックラッシュを少なくするように設計された電気サーボモータによる偏心カム式、ボールネジ式等とし、荷重及びひずみが任意に制御できる構造にする。

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。

(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、偏心カム式とボールネジ式とがあり、どちらもサーボモータを制御することにより偏心カム、ボ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、ボ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。

(3) ひずみ測定装置

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(又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 方式又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ような方法がある。押し当て型ひずみ計の例を図 2.4-6 に示す。

(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、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。図 2.4-7 にナトリウム中疲労試験に用いるアームショルダー型ひずみ計の例を示す。

③レーザー変位計(非接触型ひずみ計)

ひずみ制御型高サイクル疲労試験装置の制御に用いるレーザー変位計は、疲労試験片取り付けチャックに設け、上下チャック間の変位量を計測し、定期的に指定サイクル及び試験中の応力変化時に押し当て型ひずみ計を併用してキャリブレーションを実施し、試験片平行部のひずみ量を常に一定に保つように制御するためのものである。レーザー変位計の取り付け例と押し当て型ひずみ計を用いたキャリブレーションの例を図 2.4-8 と図 2.4-9 にそれぞれ示す。

(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、電気ヒーター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、 $\phi 0.3$ の R 熱電対(JIS 許容差クラス 2)を標準とする。また、温度制御は PID 調節式とする。

(5) 荷重測定装置(ロードセル)

荷重測定装置は、弾性材料にひずみゲージを貼り、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、又は下部ロッドに取り付けるものとし、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 $\pm 1.0\%$ 以内とする。

(6) 記録装置

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

①レコーダー

温度記録計により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

オンラインデータ収集システムにより、試験機から出力される荷重やひずみ等のデータを記録する。

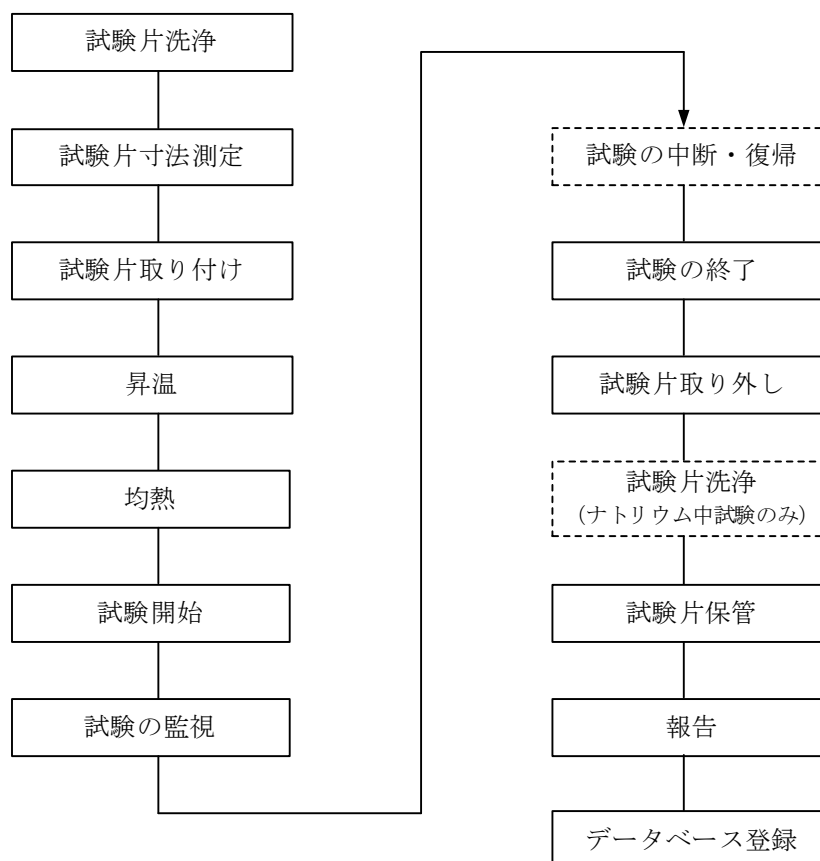
(7) 試験装置設備環境

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、試験室全体を空調設備により温度管理し、更に試験装置本体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

変動幅を小さくすることが望ましい。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。

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。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) 試験片寸法測定

試験片の寸法測定は投影機や測定顕微鏡等の寸法測定機器を用いて行う。なお、測定時には試験片の平行部に傷等を付けないように注意する。図 2.4-10 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

① 軸芯精度の確認

軸芯精度の低下は試験結果に影響をおよぼすため、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 0.05 mm, 0.01 mm 以内であることを確認するべきである。軸芯精度の確認方法は日本材料学会の高温低サイクル疲労試験法標準[4]に従う。

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らないようにする。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、昇温前に試験片の熱膨張量を計算し、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。

(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、試験片平行部では亀裂発生起点になりやすい。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、亀裂発生起点になりにくい。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 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内になるよう調整を行う。

(a)本試験前の温度分布測定(図 2.4-11 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、温度制御用熱電対 1 点を試験片の R 部にスポット溶接する。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 点取り付ける。試験片を電気炉又は高周波誘導加熱にて加熱し、試験片平行部の熱電対 3 点の温度を設定温度に対して $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内になるよう調整(電気炉は上、中、下ヒーター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。

(b)本試験時の昇温調整(図 2.4-11 参照)

本試験時は、制御用熱電対 1 点を試験片 R 部にスポット溶接し、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。

(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 2.4-12 に示すようにベ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、ベ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 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 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 $\pm 3\%$ 以内とする。

(6) 疲労データの記録

オンラインデータ収集システムにより、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。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。

(7) 応力、ひずみ及び温度の時間変化の記録

レコーダーやオンラインデータ収集システムを用いて、応力、ひずみ及び温度を連続的に記録する。

(8) 試験の監視

試験開始直後の数十サイクル(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。

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) 試験の中断・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 2.4-13 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) 試験片保管

試験終了後、試験片を包装し、試験片番号、試験条件等を明記したうえで所定の保管容器にて保管する。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必要がある。試験片にベローズ等が付いた状態でエタノ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、エタノール中で超音波洗浄を実施する。

(12) 破損繰返し数の決定

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

①硬化材

図 2.4-13 に示すように、引張ピーク応力の最大の値又は引張ピーク応力の最大値が定常となった時の値の 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 2.4-13 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 $\sigma_{\max}$ の急激な低下部を除く寿命中間以降の $\sigma_{\max}$ 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 2.4-14 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。

溶接及び異材溶接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、ナトリウム中試験の場合、Appendix 2.4-2 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, 又はその近傍の値
(全ひずみ範囲、非弾性ひずみ範囲、応力範囲)
 - ③ 初期、安定期、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

疲労試験・クリープ疲労試験実施要領を作成するにあたって参考にした JIS を以下に示す。

- JIS B 0031:2022 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状の図示方法」
- JIS B 0601:2013 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-用語,
定義及び表面性状パラメータ」
- JIS C 1602:2015 日本産業規格「熱電対」
- JIS Z 2279:1992 日本産業規格「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」
- JIS Z 3001-1～7 日本産業規格「溶接用語」
- JIS Z 8401:2019 日本産業規格「数値の丸め方」

2.5 内圧封入型クリープ試験（含クリープ破断試験）

2.5.1 適用範囲

本項の規定は高速炉用燃料被覆管の不活性雰囲気中内圧封入型クリープ試験に適用するものである。

2.5.2 適用規格及び用語の定義

(1) 適用規格

この要領で定められる以外の試験方法については、JIS Z 2271 に準拠するものとする。

(2) 用語の定義

本試験に関する用語の定義を表 2.5-1 に示す。

2.5.3 試験片

試験片は、高速炉用燃料被覆管であり、内部にヘリウム(He)ガスを封入(内圧封入型クリープ試験片、以下、試験片という)したものである。試験片を定格温度に昇温した時に所定の内圧(試験応力)が負荷されるように設定されている。また、試験片には寸法測定時に必要なマーカと番号を付ける。なお、内圧封入型クリープ試験は試験の性質上、試験片の封入ガスを試験途中で追加することはできないため、ODS 鋼などクリープ破断ひずみが非常に小さく、試験中の内圧変化が非常に小さいと評価できる材料にのみ適用可能である。

(1) 試験片形状

試験片は、原則として実機材と同一径のものをを用い、外径の 4 倍以上の長さを標準とする。
図 2.5-1 に試験片の製作加工例を示す。

(2) 端栓部の加工方法

試験片の両端は原則としてエンドプラグを溶接して封止する。場合により金属ワイヤーの巻き付け等により溶接部からの破断を避ける構造とする。

(3) 試験片の圧力設定

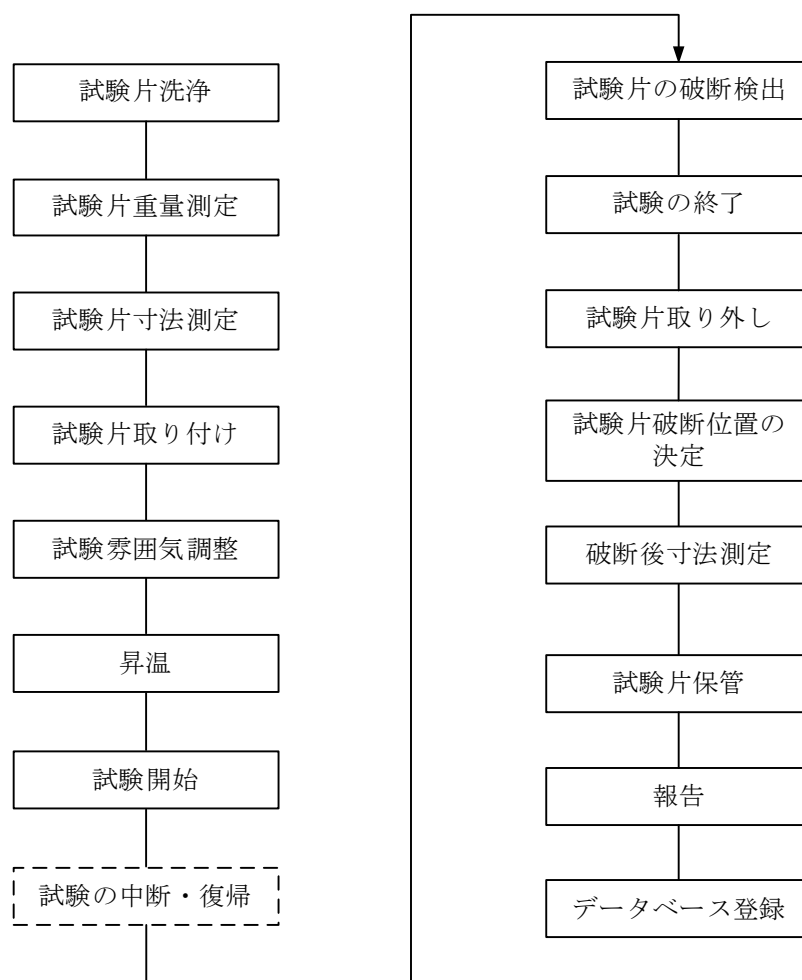
試験片へのガス封入圧力は、試験温度に達した時に設定応力条件を満たす様、ボイル・シャルルの法則を用いて算出する。

2.5.4 試験装置

試験装置は、加熱炉、アルゴンガス系、真空ポンプ、ヘリウムリークディテクター、ガスサンプリング系、制御系、水冷却系等から構成される。

2.5.5 試験方法

試験片を試験部に装着した後、試験片の酸化を防止するため不活性雰囲気の加熱炉内で試験温度まで昇温する。なお、試験の目的上、定時的なクリープ変形量(管の膨れ)の測定が求められる場合には、破断時と設定時間毎に試験片を取り出し、重量及び外径寸法(ひずみ)測定を実施する。破断試験片については、破断位置と破損形態を特定する。内圧封入型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) 試験片重量測定

内圧封入型クリープ試験の破断は封入ガス(ヘリウム)の重量変化量などにより判定することから、精密重量測定器を用いて試験片重量を測定する。なお、試験前後の試験片の重量変化は微細なため、使用する機器は、最小計量値が数 mg オーダーのものが望ましい。

(3) 試験片寸法測定

外径寸法測定は、レーザーマイクロメーター等の高精度な寸法測定機器を使用して測定する。試験前後の試験片の寸法変化は微細なため、最小読取り精度は数 μm 以下の測定器を使用することが望ましい。試験片の測定位置は、原則長手方向に数 mm 間隔で円周 4 方向の測定を実施する。試験片の種類と寸法測定箇所の概略図と測定箇所の例を図 2.5-2 に示す。

(4) 試験片取り付け

試験片ホルダー等の治具を用いて、不活性雰囲気加熱炉内に試験片を取り付ける。

(5) 試験雰囲気調整

加熱炉内部を真空排気し、アルゴンガス等の不活性ガスにより雰囲気を置換する。置換する不活性ガスは試験片の酸化を防止するため、高純度のものを使用することが望ましい。

(6) 温度制御方法

① 試験部の昇温

試験部の昇温に際しては、試験温度近くまでの加熱に要する時間を 1 時間以上とし、最大で 24 時間以内とする。試験部の温度が試験温度に達した時間を試験開始時間とする。また、試験部の昇温には、試験温度を超えないようにする。なお、昇温時には加熱炉内の雰囲気圧力が高くなるので減圧し調整する。

② 許容温度範囲

試験時は、加熱炉内全体の温度を測定できるように熱電対を複数箇所に固定し、それぞれの温度が表 2.2-2 に示す目標範囲内となるように加熱炉の出力を調整する。この際、熱電対で炉内雰囲気の温度を測定するため、固定する際は加熱炉の炉壁や治具等に熱電対の先端が触れないよう注意する。

③ 試験時間と試験維持

試験中熱供給が阻害され、温度が表 2.2-2 に示す温度範囲下限より低くなったときの時間は、試験時間から除外する。また、温度調節器の故障などにより、温度が表 2.2-2 に示す温度範囲上限を超過した場合、その試験は中止とし、試験データとして取り扱わない。

④ 熱電対の仕様

試験温度計測用の熱電対には碍子型素線熱電対を使用する。アルゴン中試験は碍子型素線 ($\phi 0.5$)R 熱電対(JIS 許容差クラス 2)を使用する。

(7) 試験の中断・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、試験片の重量・寸法測定後に復帰する。

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。

(8) 試験片の破断検出

炉内の雰囲気ガスをサンプリングし、試験片に封入したヘリウムガスのリークの有無を確認する。ガスサンプリングの間隔は原則約 1 時間に 1 回以上とし、ヘリウムリークディテクターがヘリウムガス濃度の上昇(リーク)を検知することで破断を検出する。

最初にリークを検知した時点を破断検出時間とする。試験中は炉内の温度とヘリウムリークの有無を連続的に記録し、破断検出時間と相違が無いことを確認し、それを「破断時間」とする。

(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、試験温度到達の時点からクリープ破断又は試験時間達成に至るまでの時間を破断時間又は試験時間とする。ただし、試験途中で中断した時間は差し引くものとする。

(10) 試験片破断及び破断位置の決定

目視又は浸透探傷検査により、試験片の破断を確認した場合、破断とする。また、試験前重量と試験後重量を比較し、重量の減少(試験片内ガス重量分の変化)があれば破断とみなす。

(11) 破断後寸法測定

破断後の試験片は寸法測定機器を用いて長手方向に数 mm 間隔で円周方向の複数箇所の寸法測定を実施する。寸法測定結果から試験片の平均ひずみであるふくれ率を算出する。

(12) 試験片保管

第 2.1 項引張試験と同様である。

2.5.6 試験結果の報告

内圧封入型クリープ試験データの報告事項を以下に示す。

- (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 試験雰囲気
 - ② 試験温度
 - ③ 試験応力
- (5) 試験方法
- (6) 試験結果
 - ① 破断時間

- ② ふくれ率(平均ひずみ量)
- ③ 破断位置及び破損形態(V、F、P)
- ④ ひずみ挙動データ

2.5.7 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。

2.5.8 引用規格

内圧封入型クリープ試験実施要領を作成するにあたって参考にした JIS を以下に示す。

- JIS B 0031:2022 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状の図示方法」
JIS B 0601:2013 日本産業規格「製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-用語，
定義及び表面性状パラメータ」
JIS C 1602:2015 日本産業規格「熱電対」
JIS G 0202:2013 日本産業規格「鉄鋼用語(試験)」
JIS Z 2271:2019 日本産業規格「金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法」
JIS Z 8401:2019 日本産業規格「数値の丸め方」

謝 辞

本技術資料を作成するに当たり、株式会社アセンドの石上 勝夫氏、小沼 輝充氏に多大なご協力を頂きました。ここに深謝の意を評します。

参考文献

- [1] 高速増殖炉開発本部構造材料グループ、構造材料グループ・プラントメーカー連絡会、
「FBR 金属材料試験実施要領書」作成ワーキンググループ、FBR 金属材料試験実施要領
書、PNC TN241 77-03 (1977) 88p.
- [2] 加藤 章一、鬼澤 高志、吉田 英一、青砥 紀身、FBR 金属材料試験実施要領書(改訂版)(マ
ニュアル)、JNC TN9520 2001-001 (2001) 111p.
- [3] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 材料規格(2022 年版)、JSME S NJ1-2022.
- [4] 日本材料学会高温強度部門委員会、高温低サイクル疲労試験法標準、JSMS-SD-7-03 (2003).

表 2.1-1 引張試験に関する用語の定義(1/2)

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)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	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)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸び計を用いて荷重－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。 $\sigma_{0.2} = P_{0.2}/A_0$
4	引張強さ (Ultimate Tensile Strength)	σ_B (MPa)	付図 2.1-1 に示すように、荷重－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)。 $\epsilon_{unif}^{1)} = \ell_m/\ell_0 \times 100(\%)$
		$\epsilon_{unif}^{2)}$ (%)	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 で除した値(付図 2.1-1 参照)。 $\delta = (\ell - \ell_0)/\ell_0 \times 100(\%)$
7	絞り (Reduction of Area)	Z (%)	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。 $Z = (A_0 - A)/A_0 \times 100(\%)$
8	見かけの縦弾性係数 (Apparent Elastic Modulus)	E_a (MPa)	荷重－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した値。

表 2.1-1 引張試験に関する用語の定義(2/2)

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、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。このような明示方法については図 2.1-12 に示す通りである(JIS Z 2241 準拠)。なお、溶接継手及び異材溶接継手の場合も 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、降伏開始点が上降伏点($P_{y,u}/A_0$)、降伏が進展する過程が下降伏点($P_{y,l}/A_0$)であり、付図 2.1-1 に示す通り。
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。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^* (MPa)	破断荷重 P_f を破断部の最小断面積 A で除した値(付図 2.1-1 参照)。 $\sigma_f^* = P_f/A$
13	公称応力 (Nominal Stress)	σ (MPa)	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。 $\sigma = P/A_0$
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。 $\varepsilon = (l-l_0)/l_0 \times 100(\%)$
15	真応力 (True Stress)	σ^* (MPa)	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。 $\sigma^* = \sigma(1+\varepsilon/100)$
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。 $\varepsilon^* = \ln(1+\varepsilon_{unif}/100) \times 100(\%)$
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。 $\varepsilon_{unif}^* = \ln(1+\varepsilon_{unif}/100) \times 100(\%)$
18	真破断延性 (True Fracture Ductility)	ε_f^* (%)	破断時の真ひずみ。 $\varepsilon_f^* = \ln(100/100-Z) \times 100(\%)$ ここで、Z は絞り。

表 2.1-2 引張試験での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)
$T \leq 600$	± 2	± 3
$600 < T \leq 800$		± 4
$800 < T \leq 1000$		± 5
$1000 < T \leq 1100$	± 3	± 6
$1100 < T \leq 1200$		当事者間で協議
$1200 < T$		

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(1/2)

No.	用 語	標準記号 (単位)	説 明
1	試験温度 (Test Temperature)	T (°C)	試験期間中の平均温度。
2	応力 (Stress)	σ (MPa)	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 (%)	負荷完了時のひずみとクリープひずみとを足した値。(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 (%)	クリープ試験中に生じたひずみ。 (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)。

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(2/2)

No.	用 語	標準記号 (単位)	説 明
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零側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]	ϵ_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。
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)	Z (%)	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。 $Z = (A_0 - A) / A_0 \times 100(\%)$
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標点間の長さ。ツバ付き試験片の場合、原則としてツバの頂点間の長さとし、詳細は p.51 の図 2.2-1 の通り。

表 2.2-2 クリープ試験及びクリープ破断試験での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)
$T \leq 600$	± 2	± 3
$600 < T \leq 800$		± 4
$800 < T \leq 1000$		± 5
$1000 < T \leq 1100$	± 3	± 6
$1100 < T$	当事者間で協議	当事者間で協議

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

表 2.3-1 リラクセーション試験に関する用語の定義

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(p.53 の図 2.3-1 参照)。
3	公称応力 (Nominal Stress)	σ (MPa)	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 (MPa)	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 (MPa)	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。

表 2.4-1 疲労試験・クリープ疲労試験に関する用語の定義(1/2)

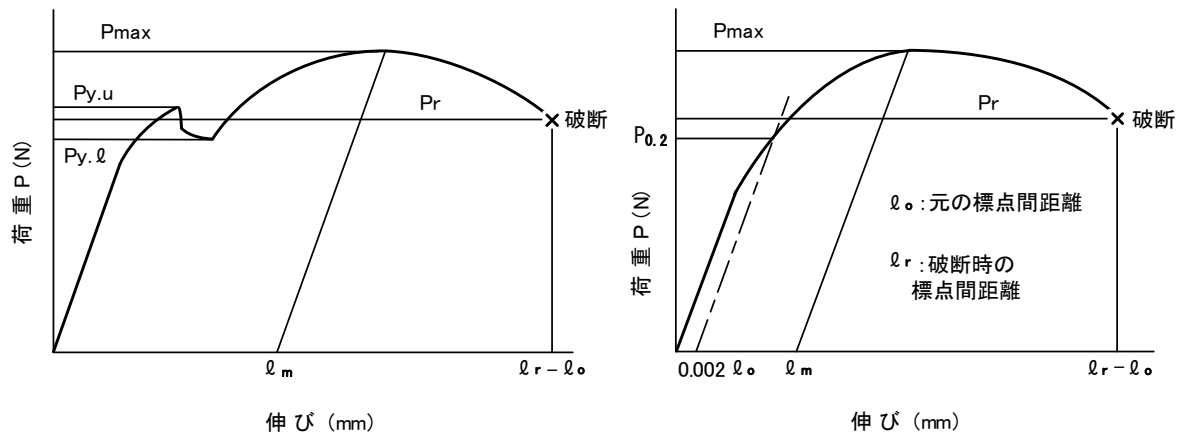
No.	用 語	標準記号 (単位)	説 明
1	サイクル (Cycle)	—	ひずみ零の状態から、最大及び最小のひずみ点を経て、再びひずみが零となる状態に至るまで(付図 2.4-1 の A→B→C→D→A)。
2	繰り返し数 (Number of Cycles)	N (cycles)	疲労及びクリープ疲労試験中のひずみの繰り返し回数。
3	ヒステリシスループ (Hysteresis Loop)	—	疲労及びクリープ疲労試験中の応力とひずみの関係を表すループ(付図 2.4-1 参照)。
4	ひずみ速度 (Strain Rate)	$\dot{\epsilon}_t$ (%/sec)	全ひずみ範囲を 1/2 周期の所用時間で除した値。
5	周波数 (Frequency)	f (Hz)	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が一定となる時間。
7	全ひずみ範囲 (Total Strain Range)	$\Delta\epsilon_t$ (%)	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)	$\Delta\epsilon_{in}$ (%)	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)	$\Delta\epsilon_e$ (%)	全ひずみ範囲から非弾性ひずみ範囲を引いた値。(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} (MPa)	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)。

表 2.4-1 疲労試験・クリープ疲労試験に関する用語の定義(2/2)

No.	用 語	標準記号 (単位)	説 明
13	緩和後の最大、最小応力 (Max., Min. Stress after Relaxation)	$\sigma'_{\max}$ $\sigma'_{\min}$ (MPa)	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 (MPa)	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)	$\Delta\sigma$ (MPa)	繰り返し応力の最大応力と最小応力との差。(最大応力)－(最小応力)
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若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)。

表 2.5-1 内圧封入型クリープ試験に関する用語の定義

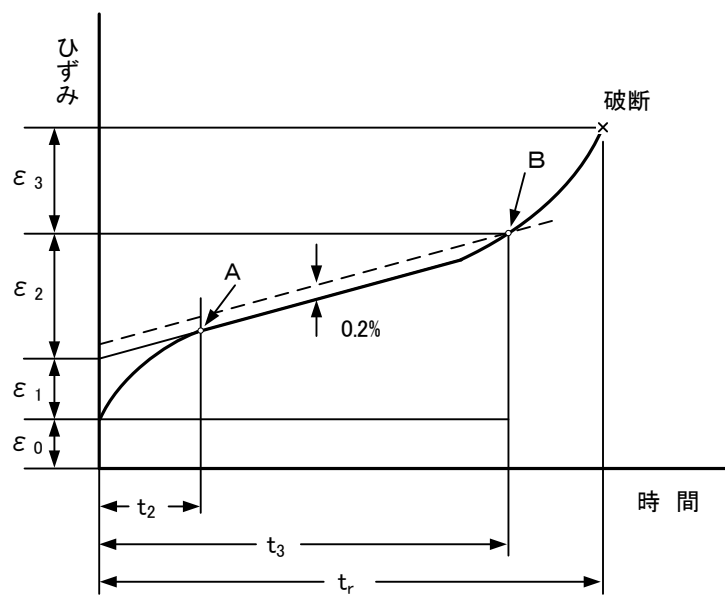
No.	用 語		標準記号 (単位)	説 明
1	試験温度 (Test Temperature)		T (°C)	試験期間中の平均温度。
2	周応力 (Hoop Stress)		σ (MPa)	試験片の周方向の応力。
3	破断時間 (Rupture Time)		t_r (hr)	所定温度到達の時点からクリープ破断にいたるまでの時間。
4	ふくれ率 (Strain)		S (%)	破断後試験片の寸法測定より求められる試験片の外径ひずみの平均値。試験後の外径の平均値 d より試験前の外径の平均値 d_0 を差し引いた値を d_0 で除した値。 $S = (d-d_0)/d_0 \times 100(\%)$
5	破損形態 (Rupture Mode)	Violent 型 (Violent Type)	V	破損個所が開口した状態。
		Fissure 型 (Fissure Type)	F	破損個所が亀裂形状。
		Pin Hole 型 (Pin Hole Type)	P	破損個所が点状。



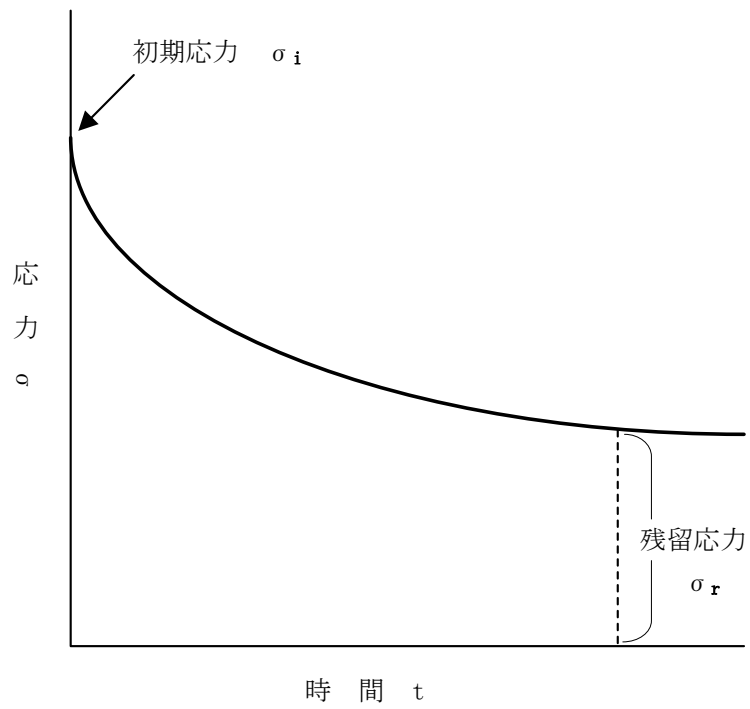
(a)上降伏点、下降伏点のある場合

(b)上降伏点、下降伏点のない場合

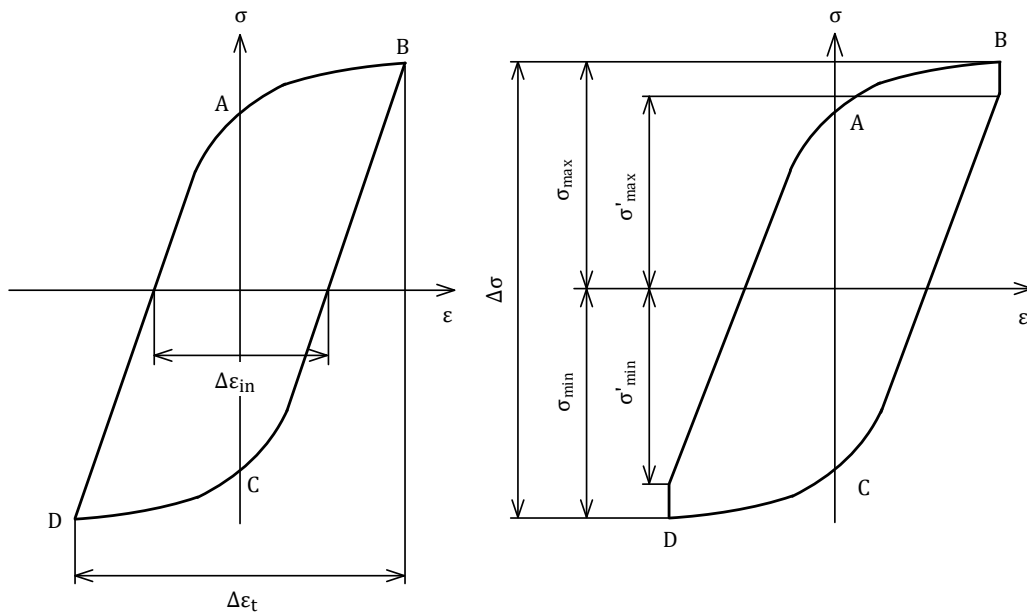
付図 2.1-1 荷重－伸び線図の一般例



付図 2.2-1 クリープ曲線の模式的説明

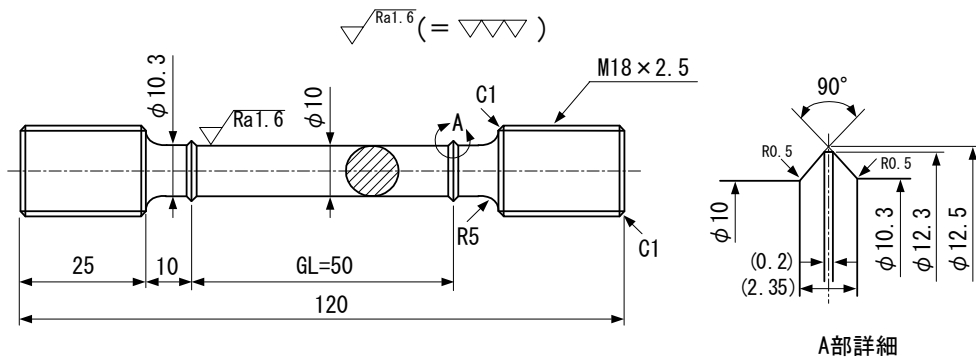


付図 2.3-1 リラクセーション曲線の模式的説明

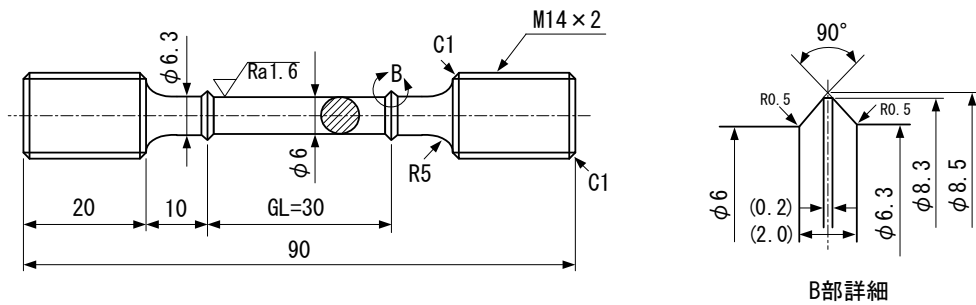


付図 2.4-1 応力ひずみ波形図の模式的説明

丸棒型試験片

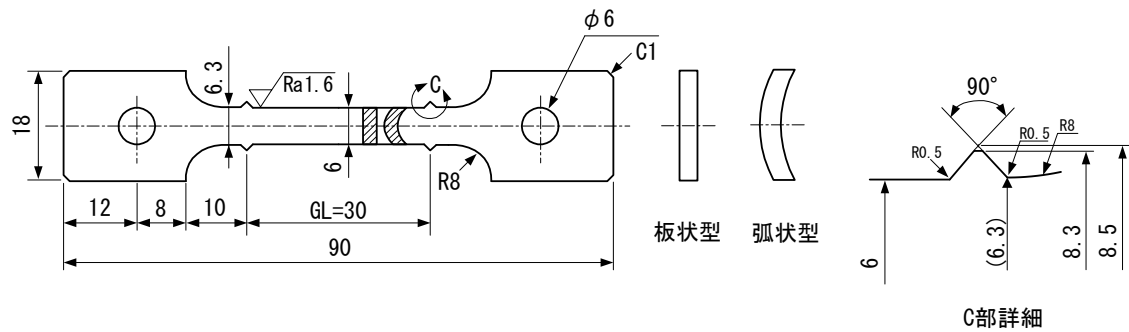


引張試験片 (10φ)



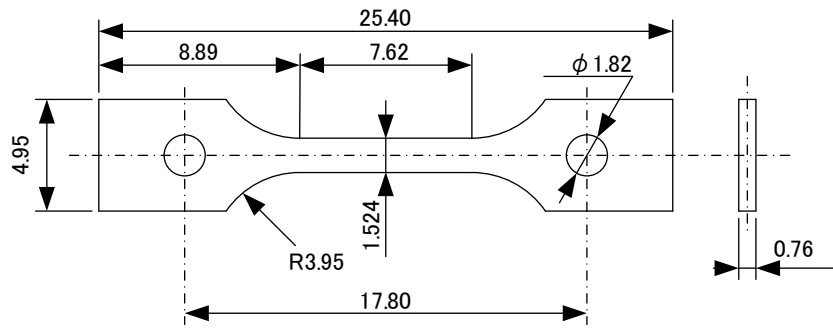
引張試験片 (6φ)

板状または弧状型試験片 (ツバ付き)

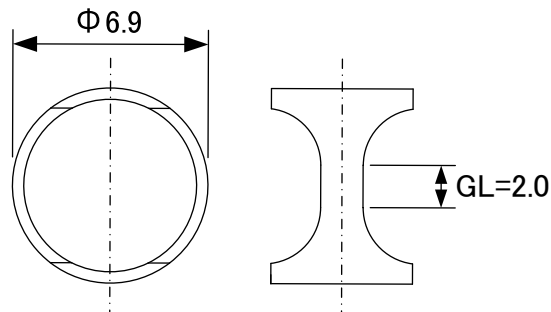


[mm]

図 2.1-1 丸棒型、板状及び弧状型試験片外観図



微小試験片



リング型試験片

[mm]

図 2.1-2 微小試験片及びリング型試験片外観図

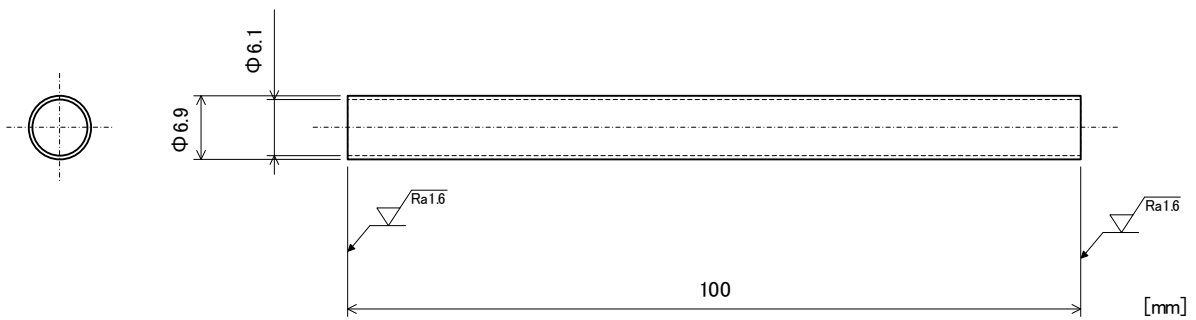


図 2.1-3 被覆管試験片外観図

[mm]

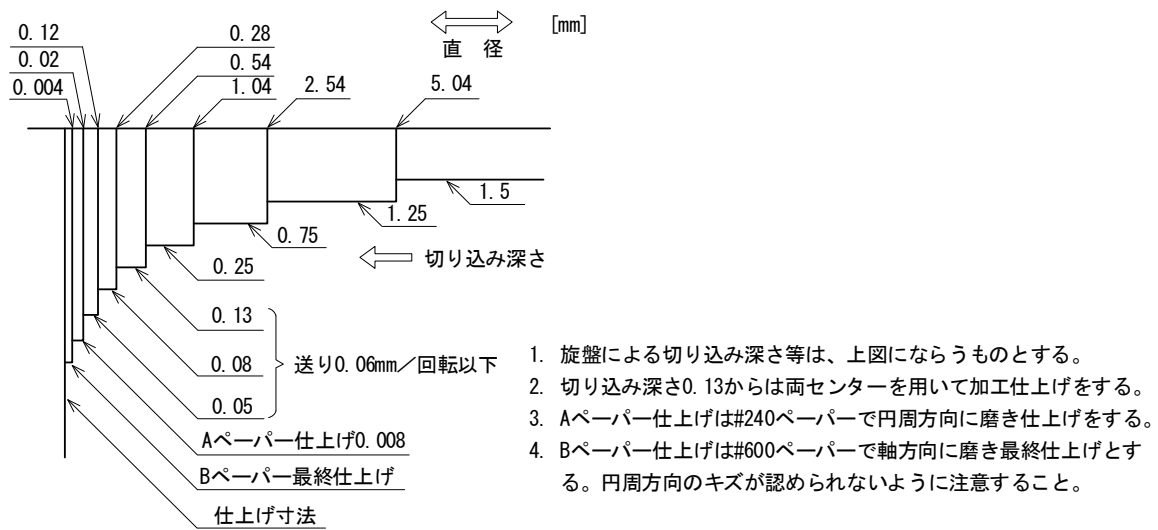


図 2.1-4 試験片平行部加工要領

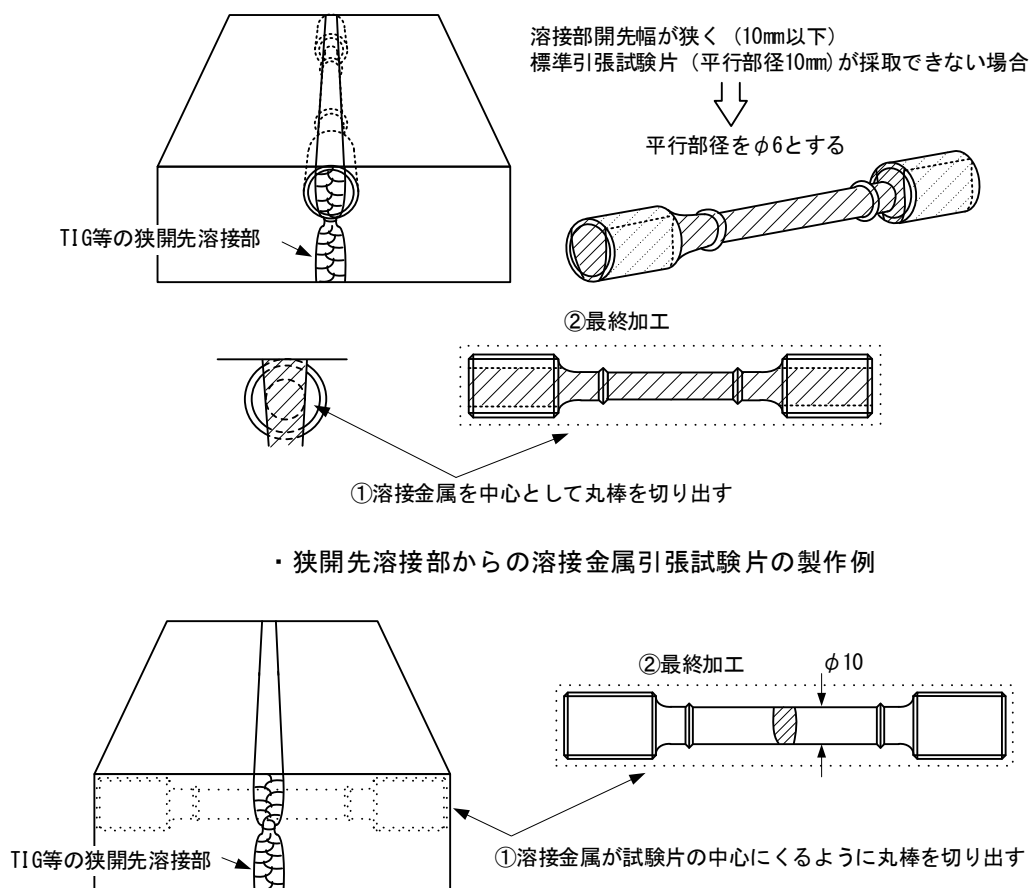


図 2.1-5 特殊引張試験片の製作例

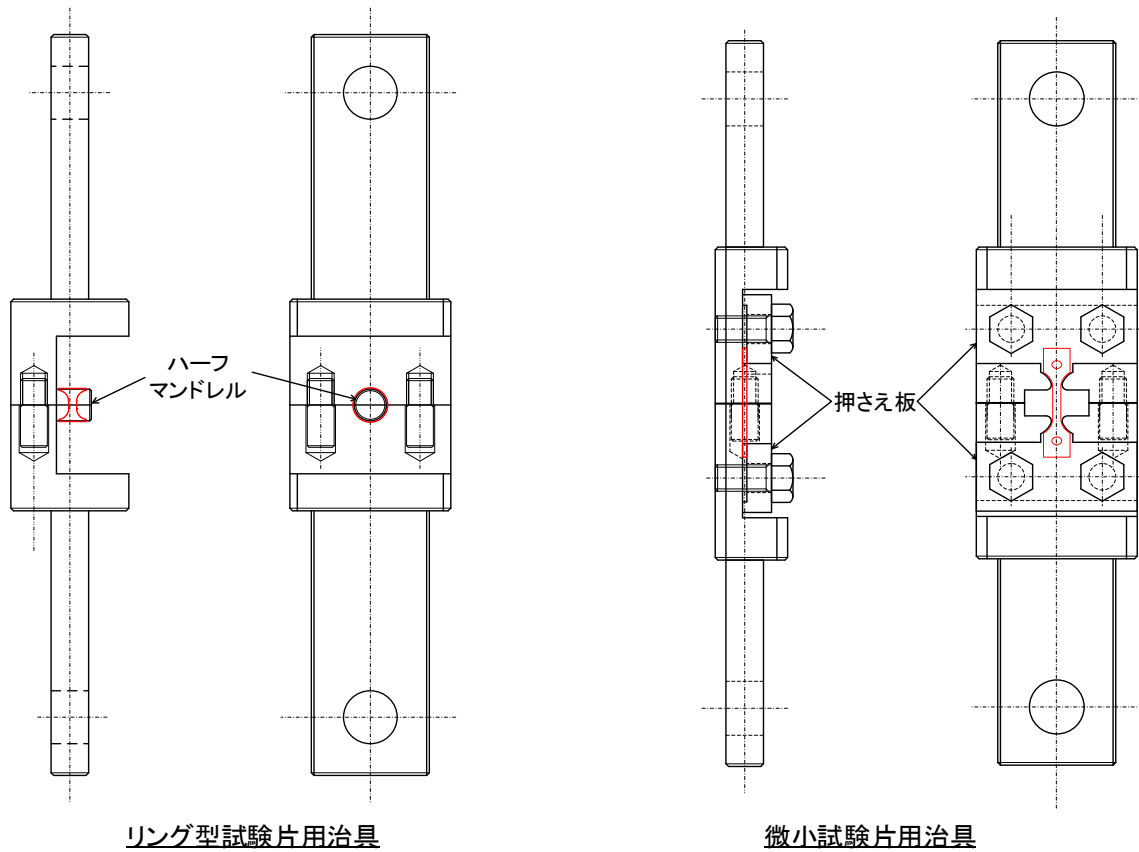


図 2.1-6 リング型試験片用治具及び微小試験片用治具の構造

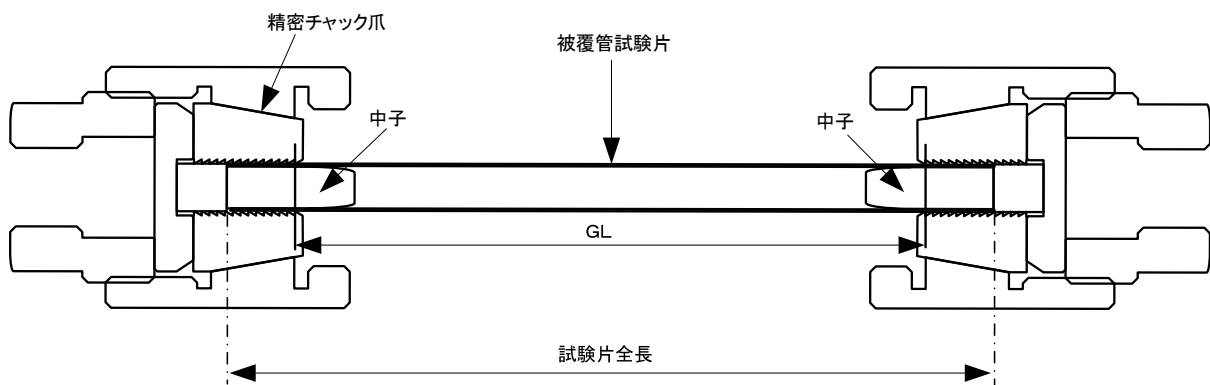


図 2.1-7 被覆管試験片固定用治具の構造

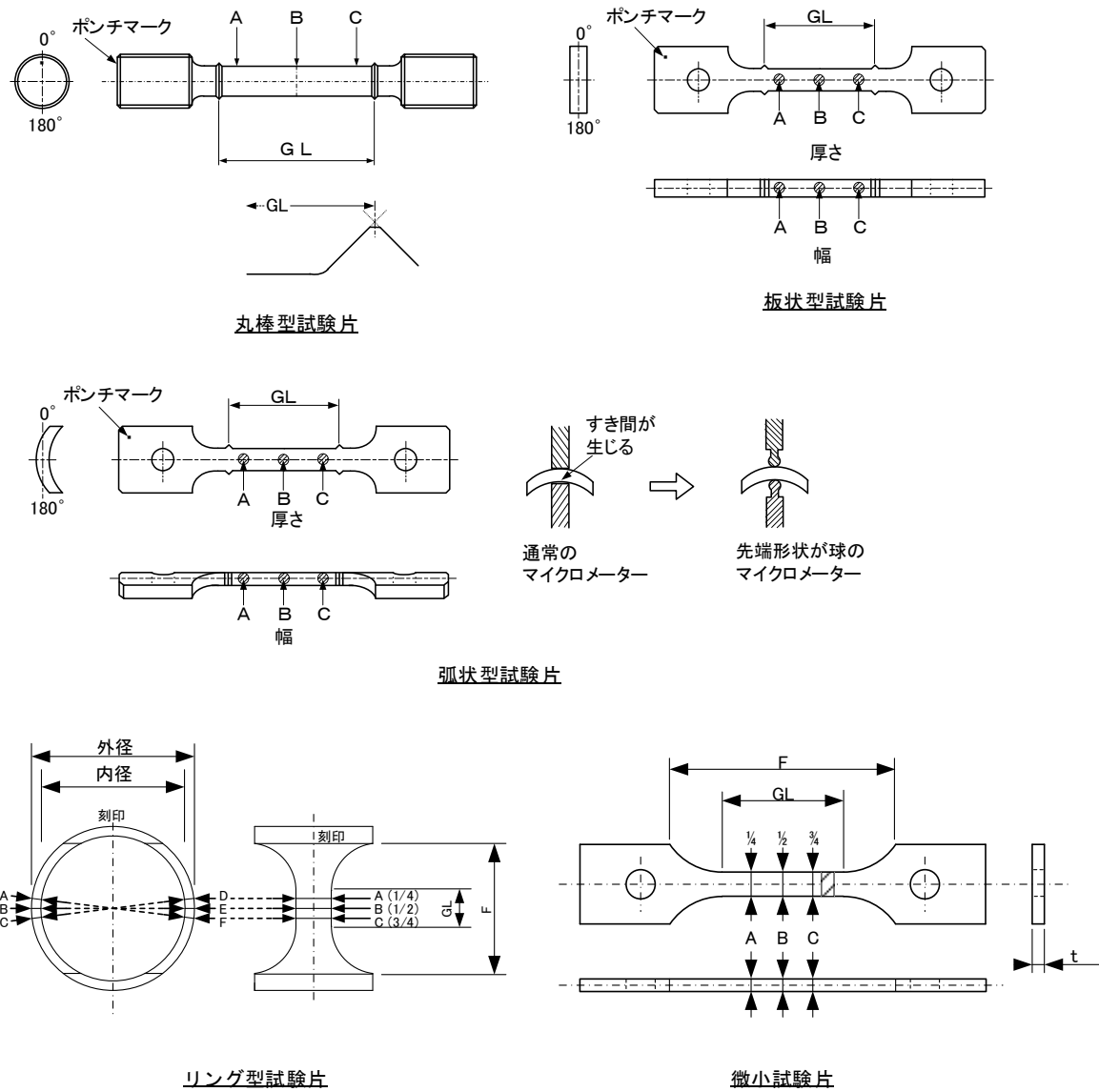


図 2.1-8 各種試験片の寸法測定位置の例

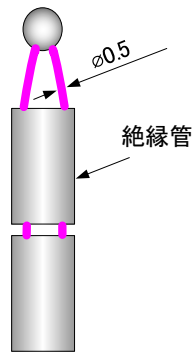


図 2.1-9 熱電対先端部の形状

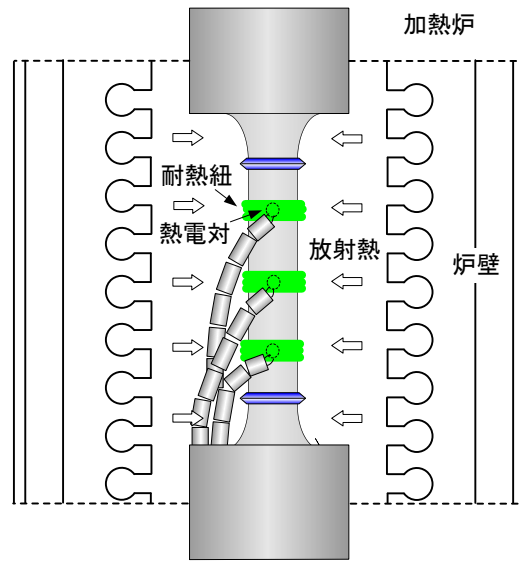


図 2.1-10 放射熱による計測誤差の防止

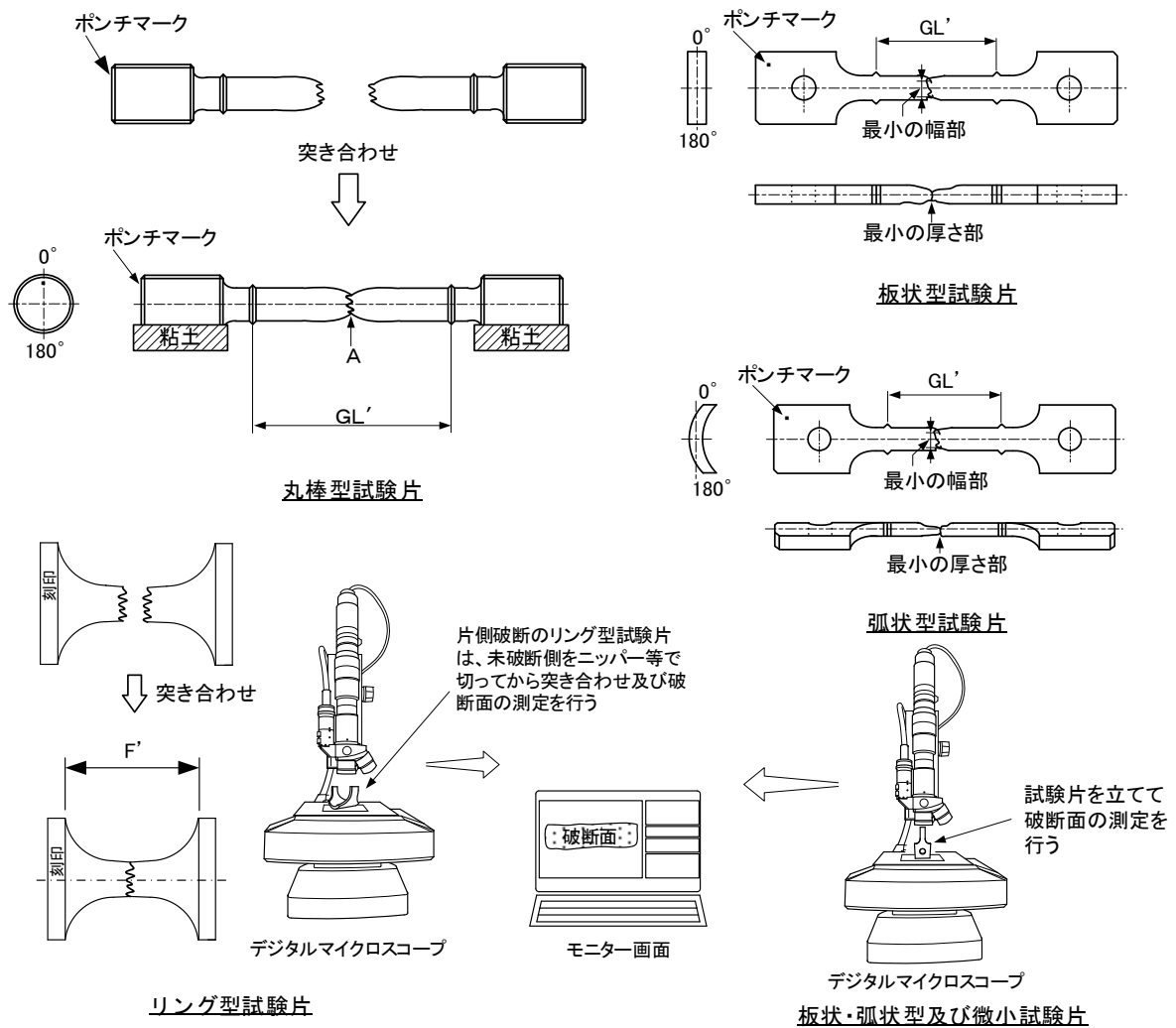
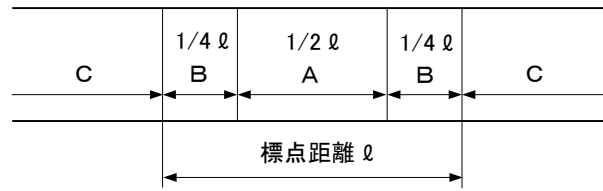
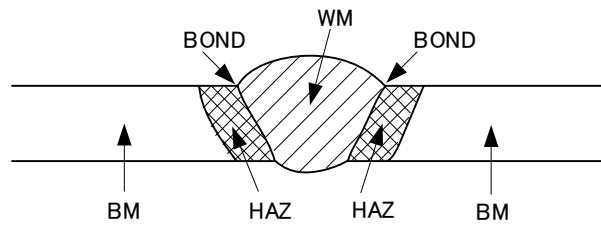


図 2.1-11 破断後の寸法測定箇所

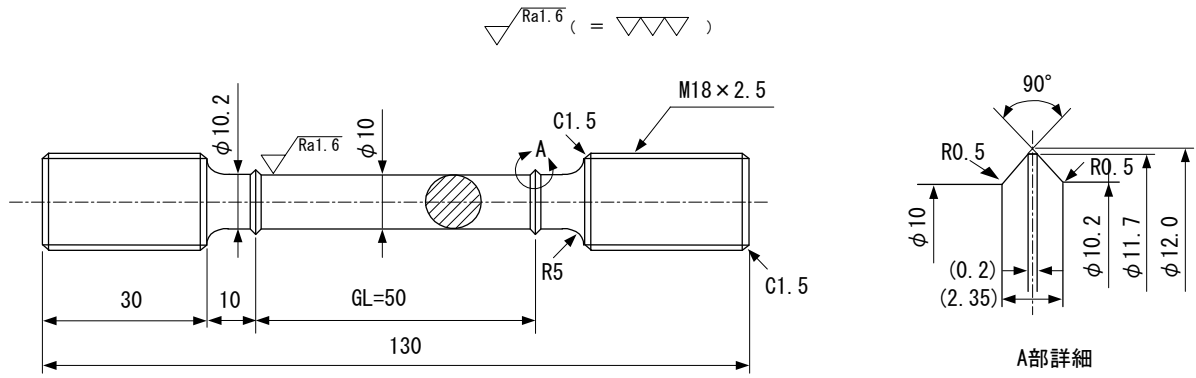


母材及び溶接金属試験片

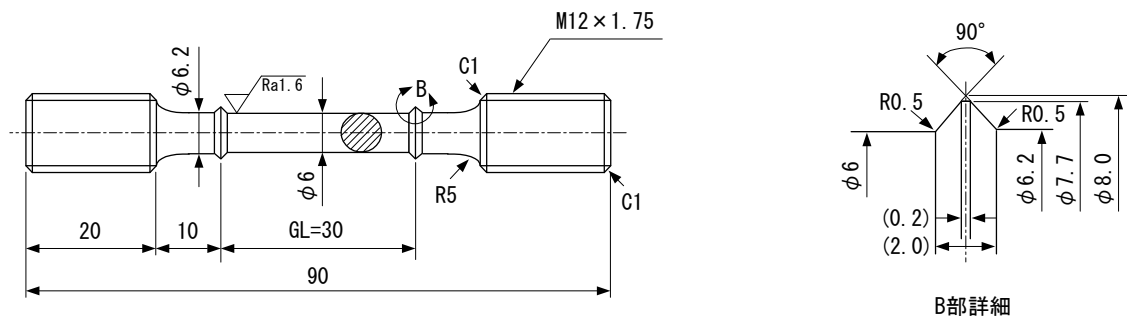


溶接継手試験片

図 2.1-12 破断位置の明示方法



クリープ試験片(10φ)



クリープ試験片(6φ)

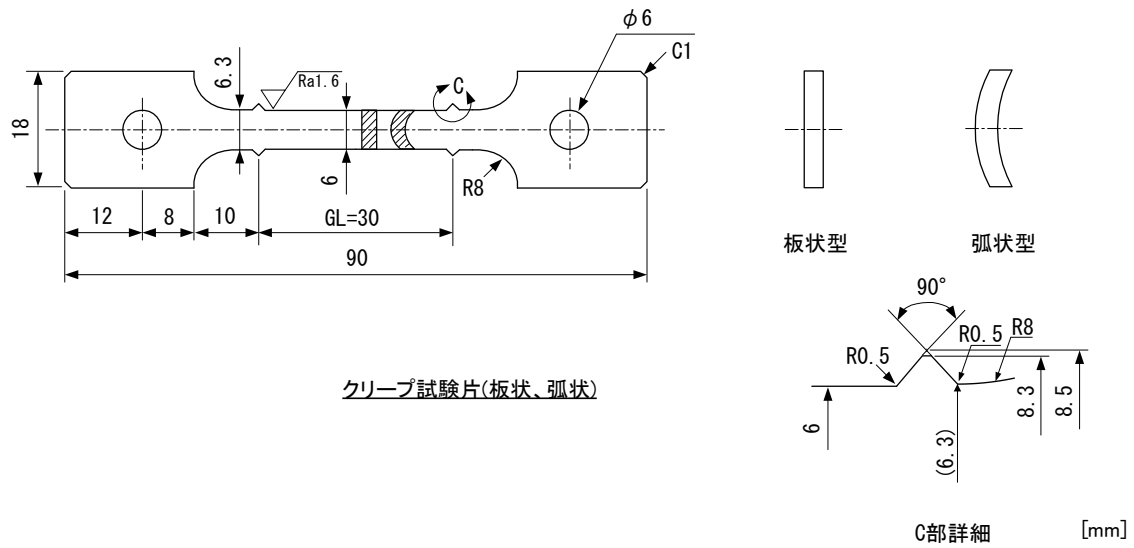


図 2.2-1 クリープ試験片外観図

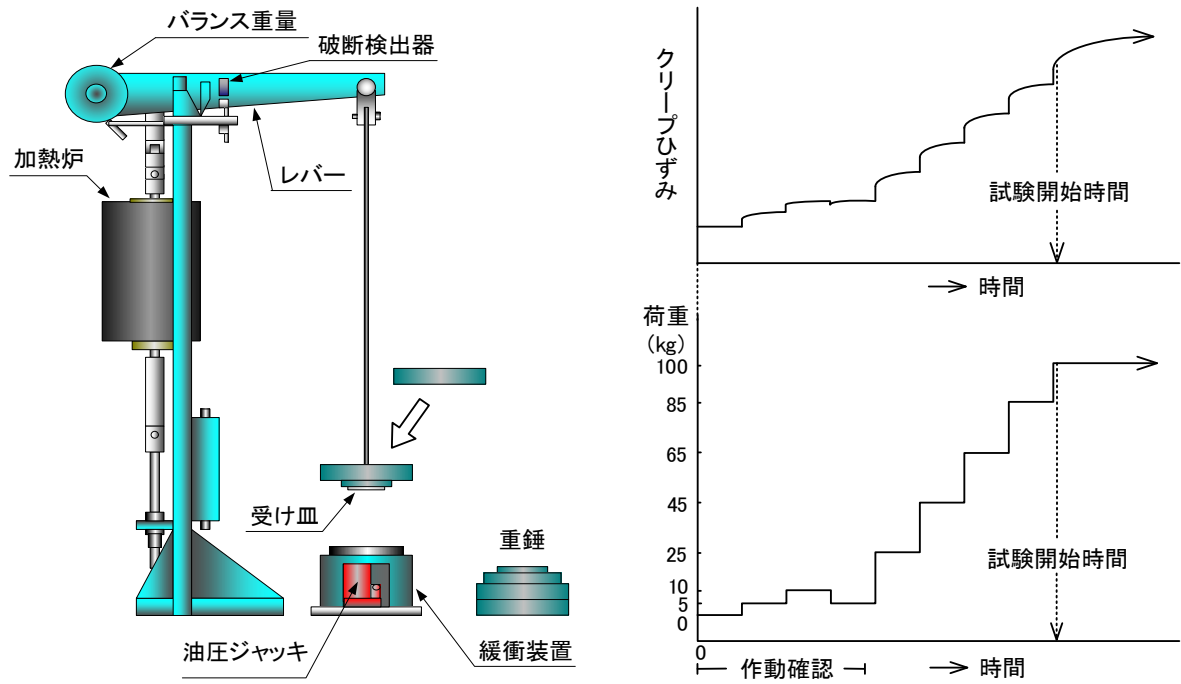


図 2.2-2 段階負荷方法

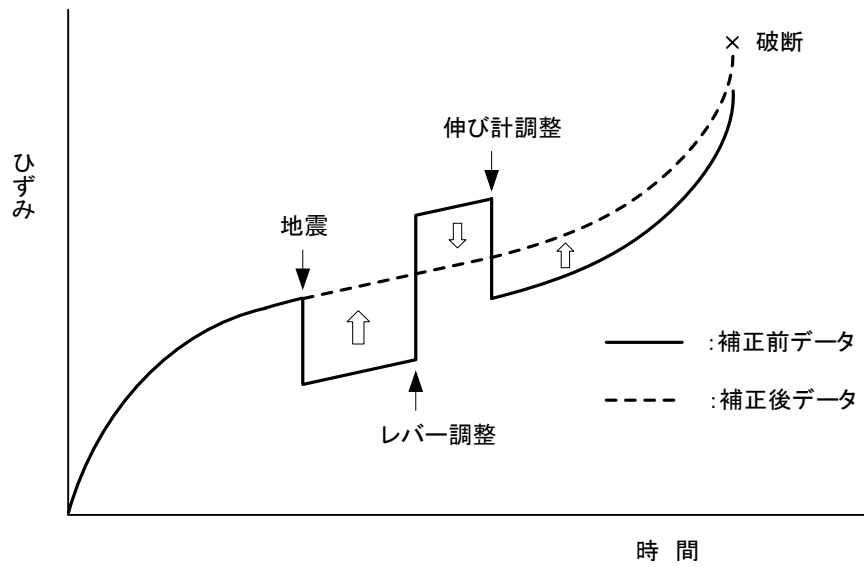


図 2.2-3 クリープ曲線のひずみ補正処理

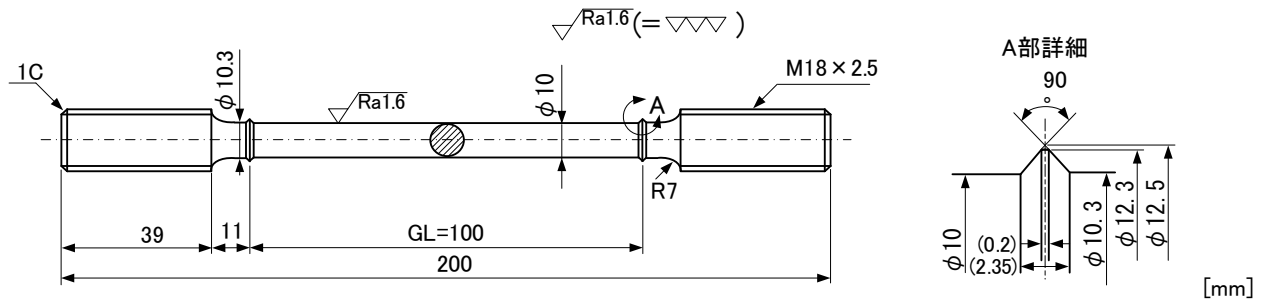


図 2.3-1 リラクセーション試験片外観図

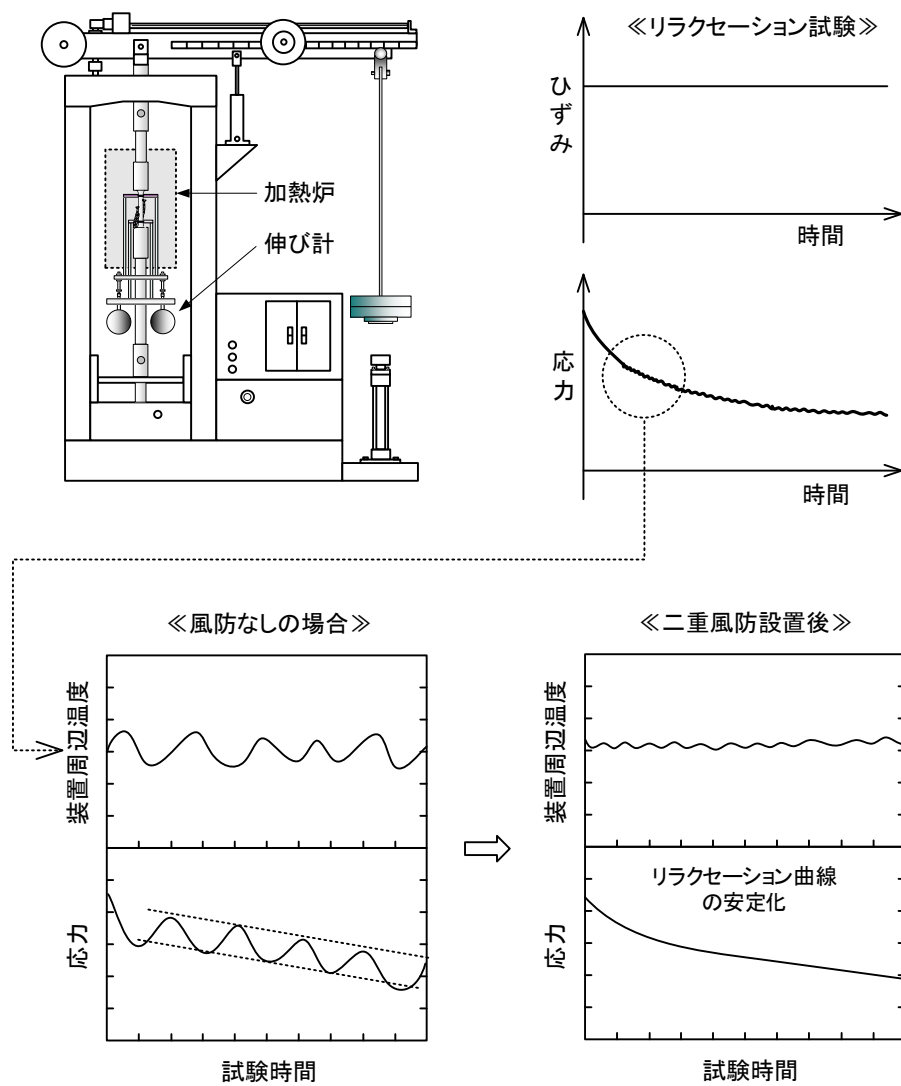


図 2.3-2 二重風防による試験精度の向上例

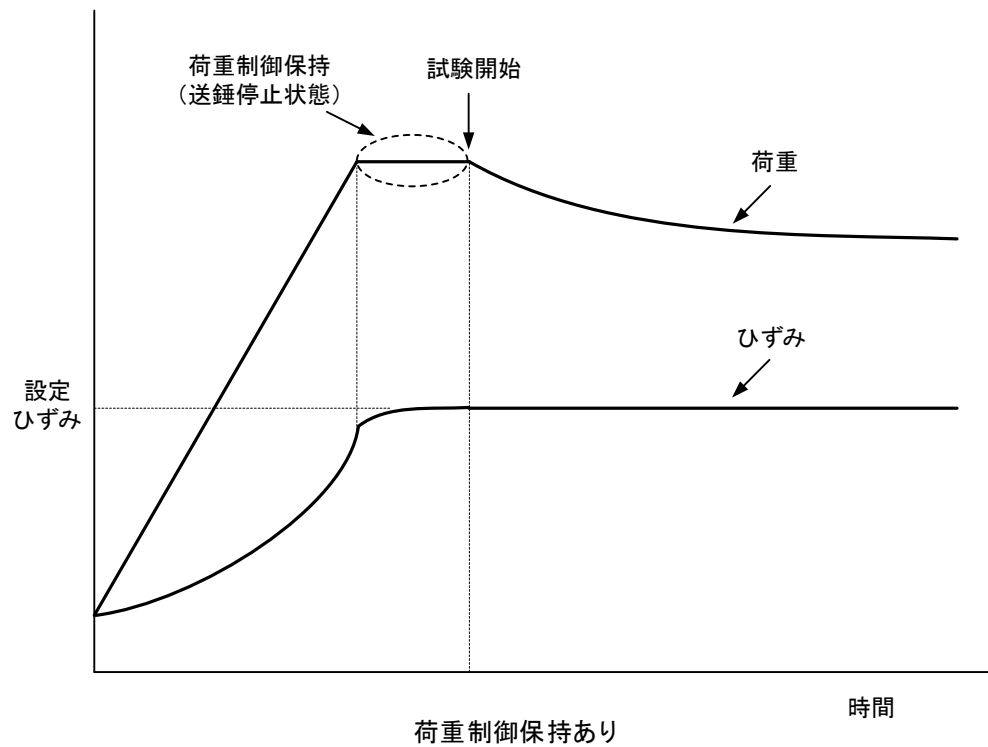
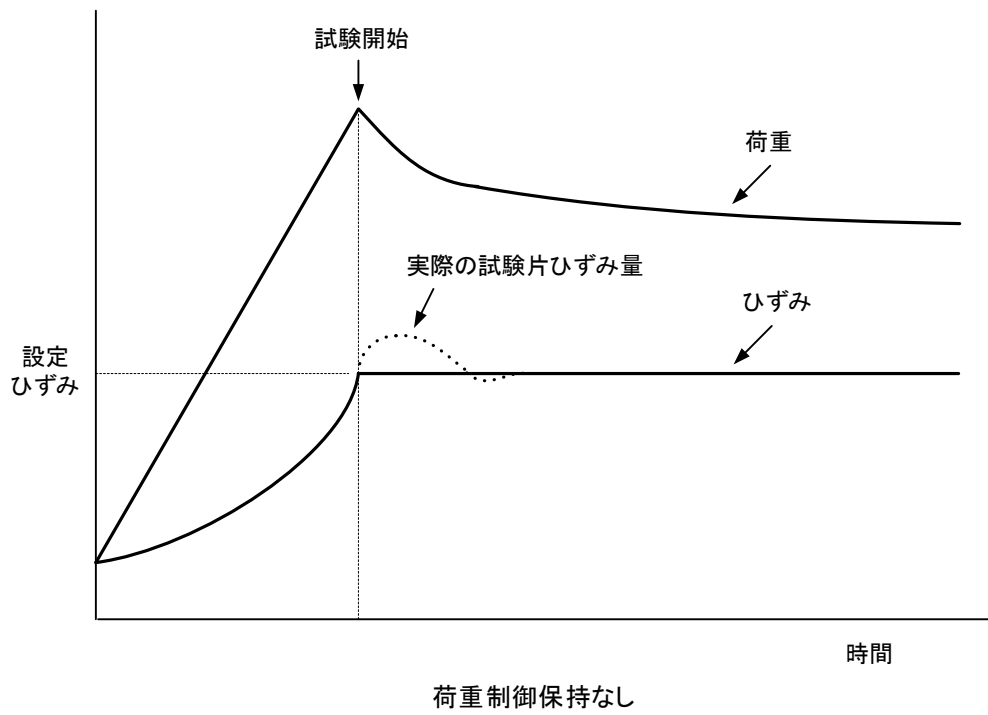
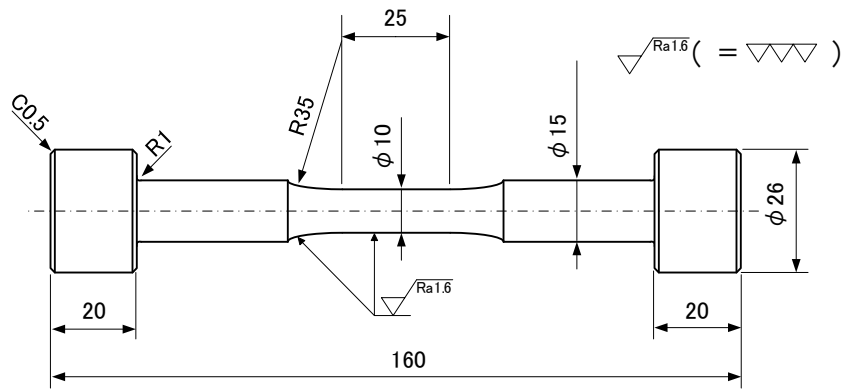
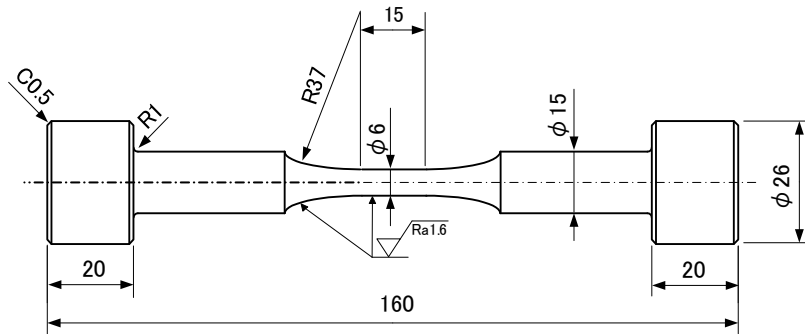


図 2.3-3 リラクセーション挙動の比較



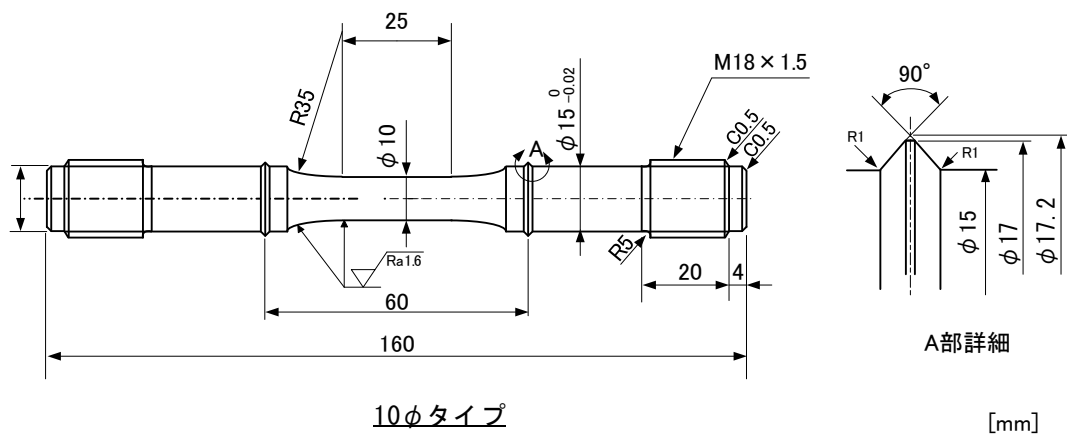
10φ、ボタンタイプ



6φ、ボタンタイプ

[mm]

図 2.4-1 大気中疲労試験片外観図(ボタンタイプ)



10φタイプ

[mm]

図 2.4-2 大気中疲労試験片外観図(ネジタイプ)

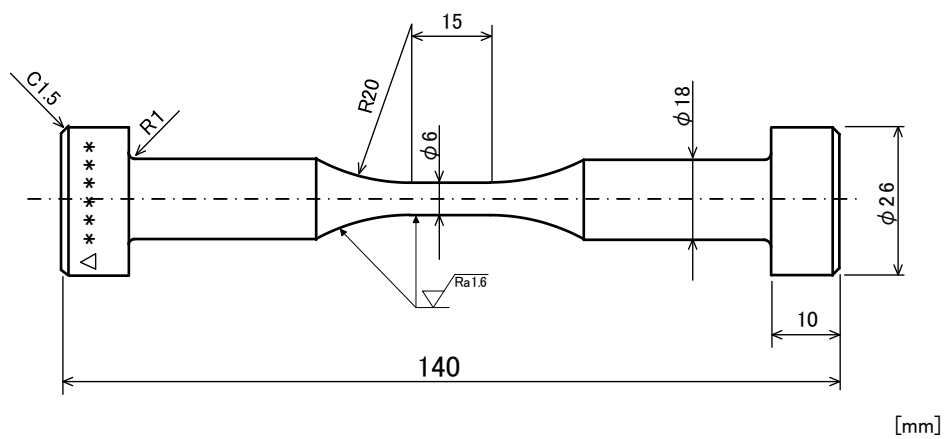
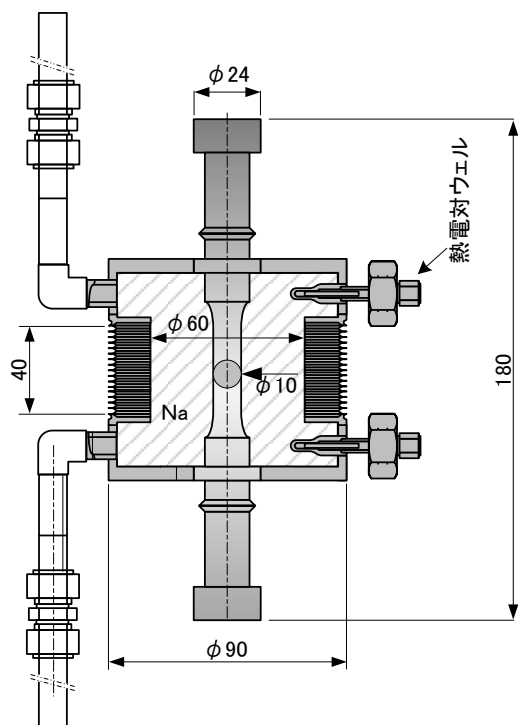
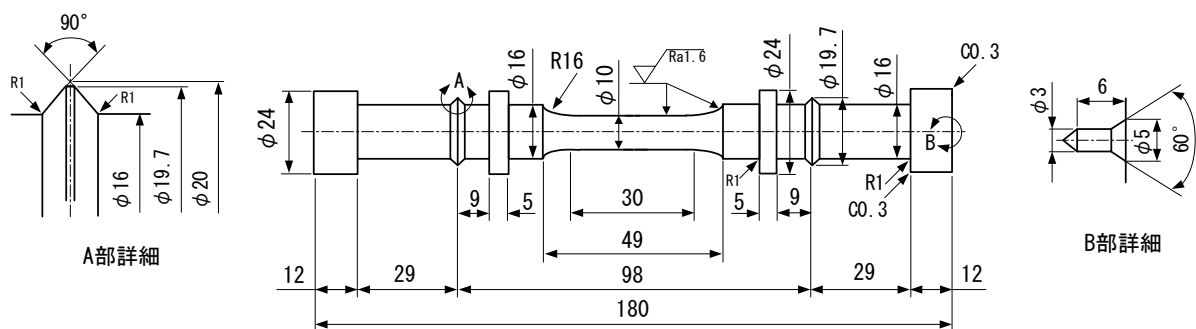
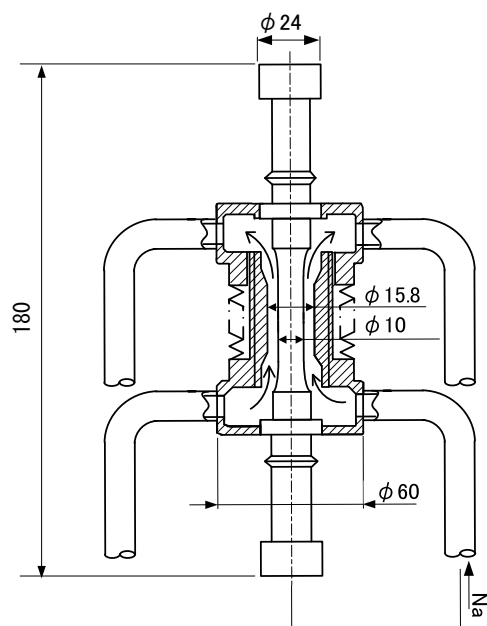


図 2.4-3 高サイクル疲労試験片外観図

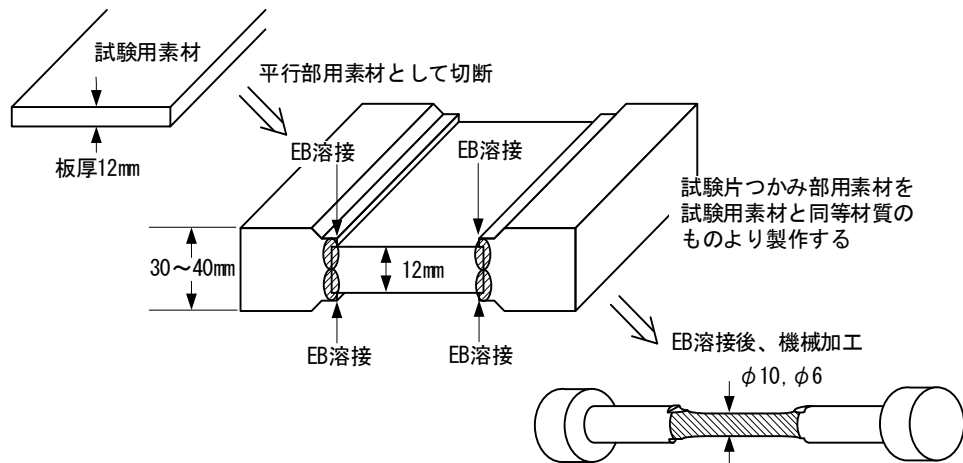


ナトリウム充填型疲労試験片外観図



流動ナトリウム中疲労試験片外観図

図 2.4-4 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 2.4-5 特殊疲労試験片の製作例

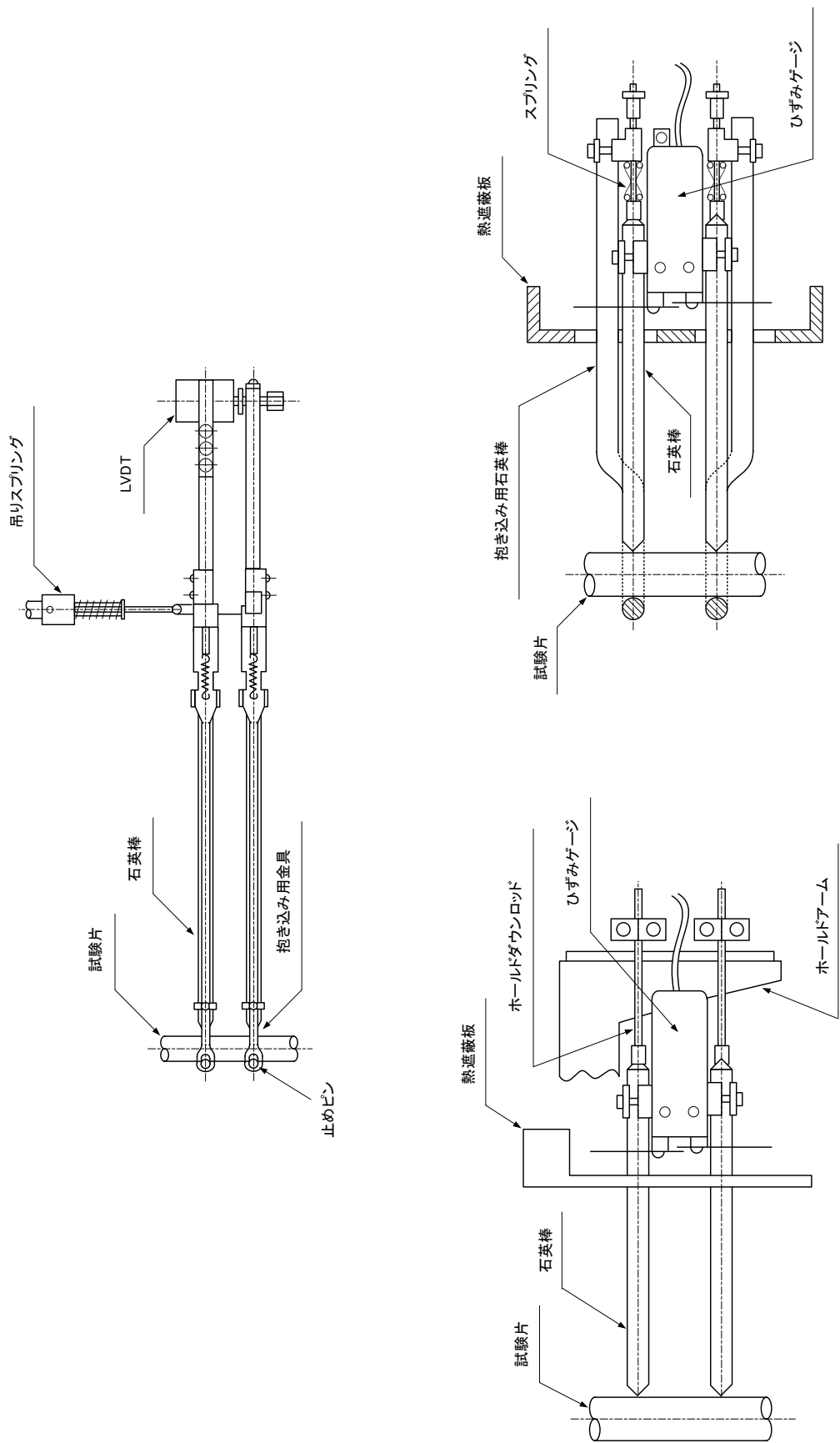


図 2.4-6 押し当て型ひずみ計の例

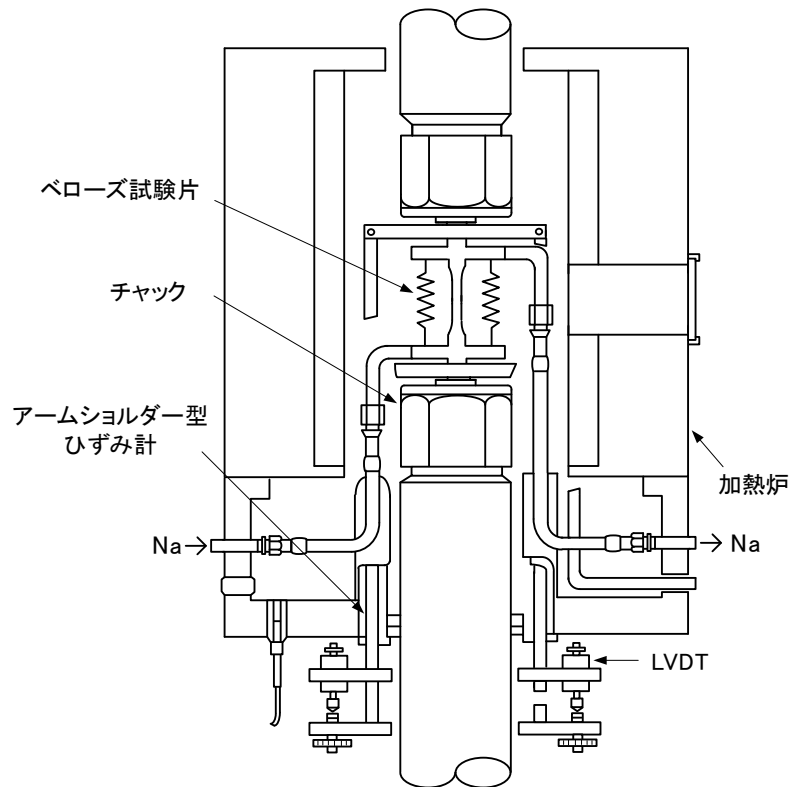


図 2.4-7 アームショルダー型ひずみ計の例

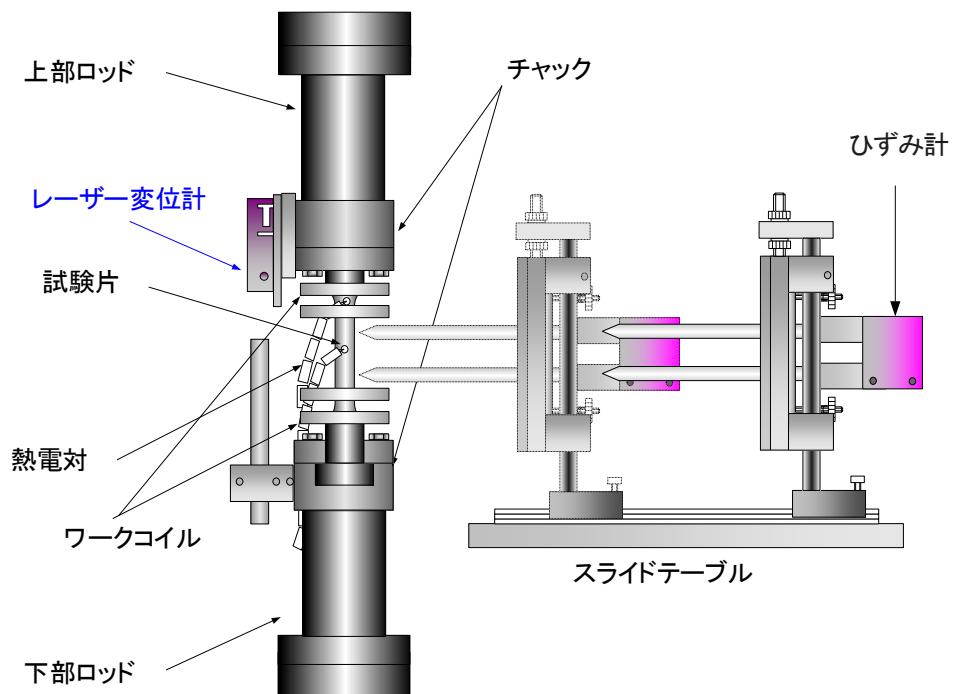


図 2.4-8 レーザー変位計(非接触型ひずみ計)取り付けの例

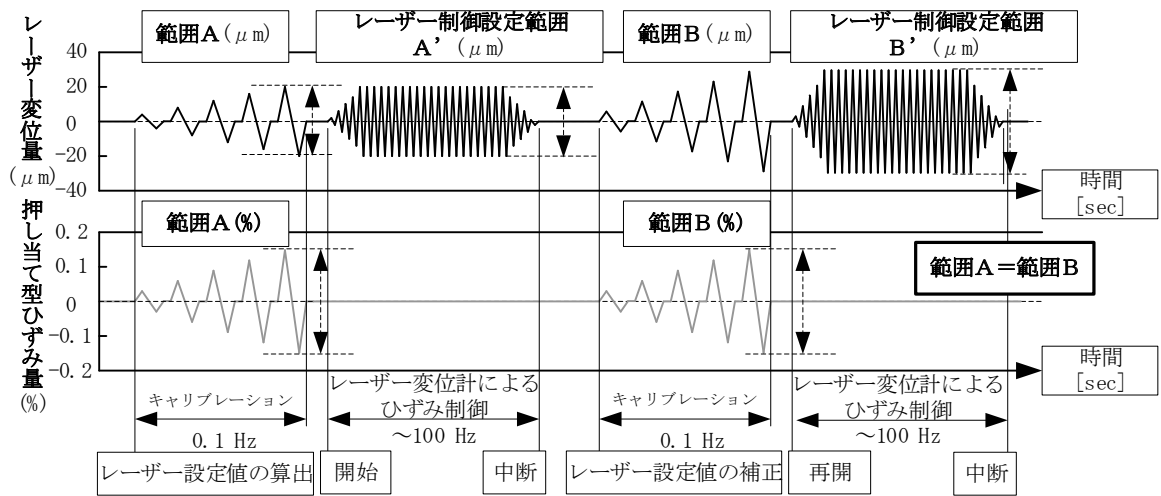
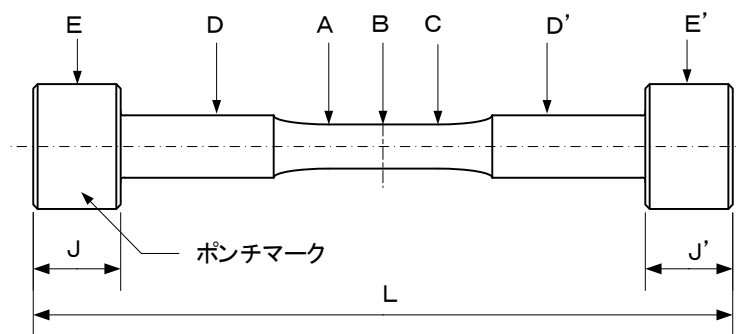


図 2.4-9 押し当て型ひずみ計を用いたキャリブレーションの例



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 2.4-10 疲労試験片寸法測定箇所

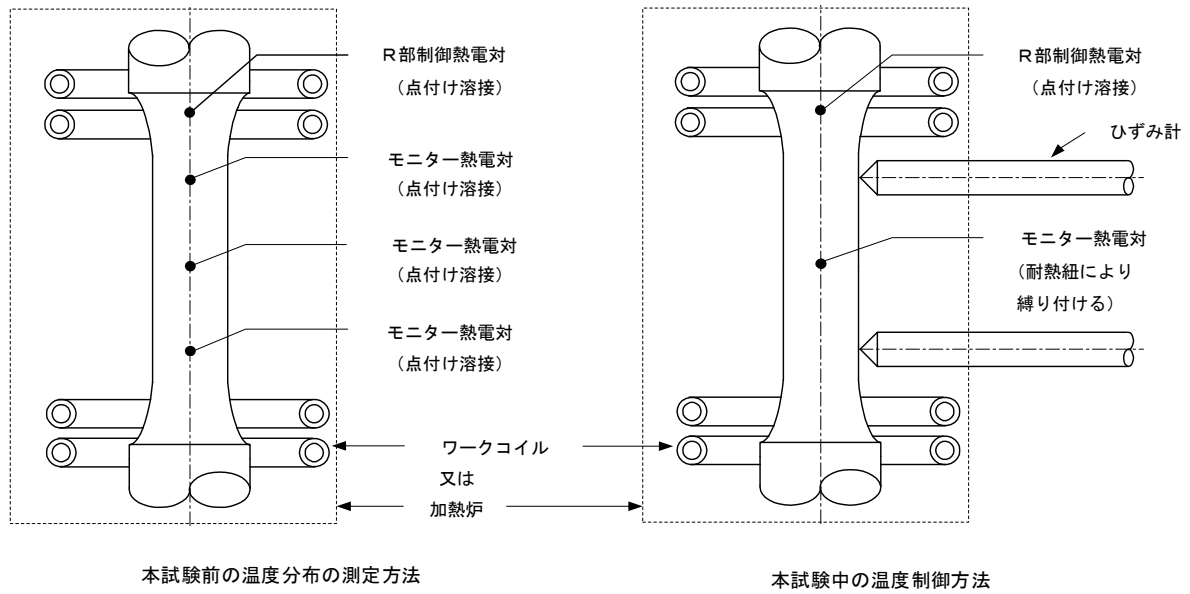


図 2.4-11 温度制御の方法

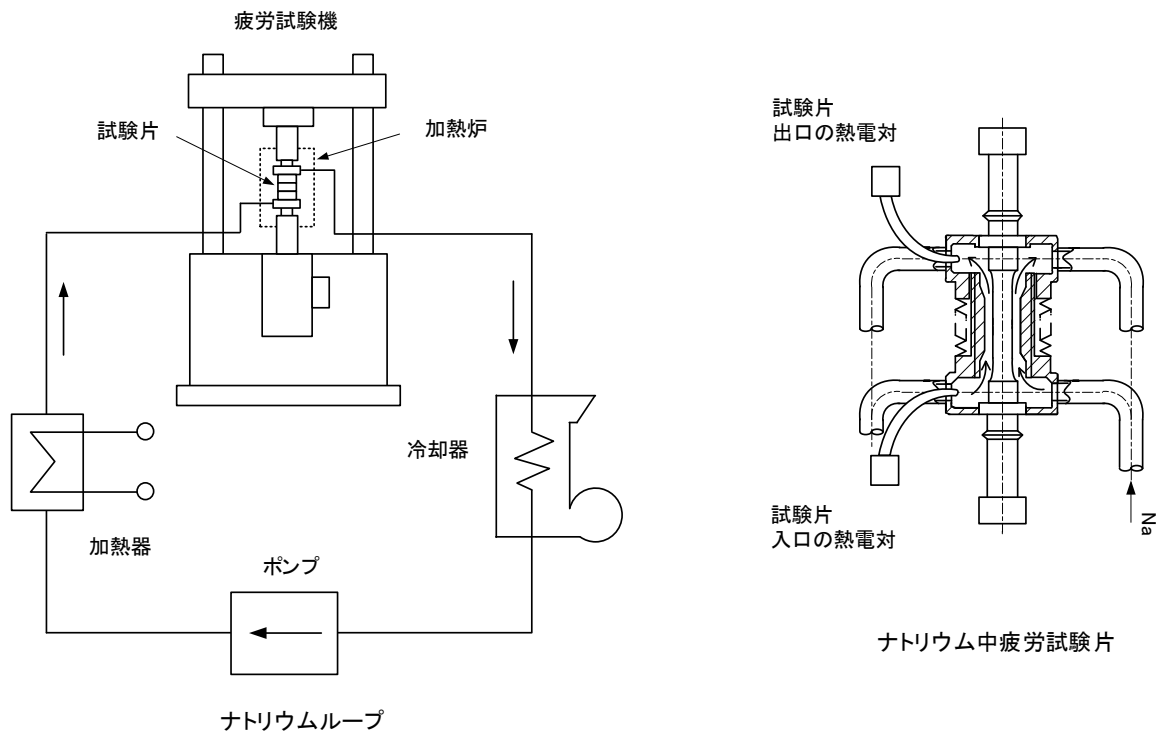
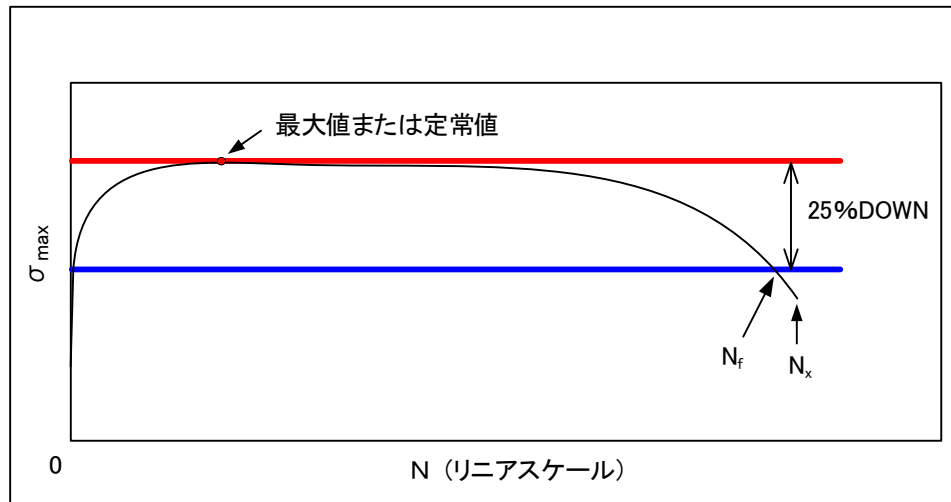
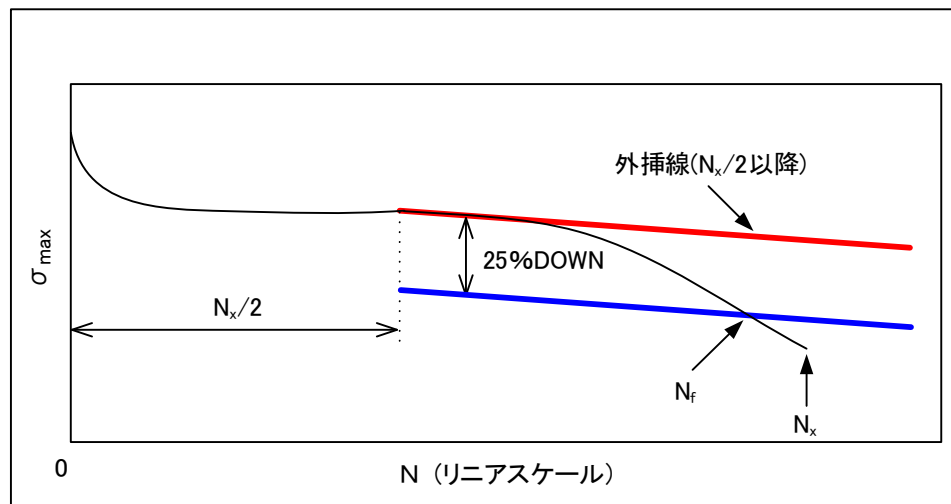


図 2.4-12 ナトリウム中疲労試験の温度制御方法



硬化材



軟化材

図 2.4-13 破損繰返し数の求め方

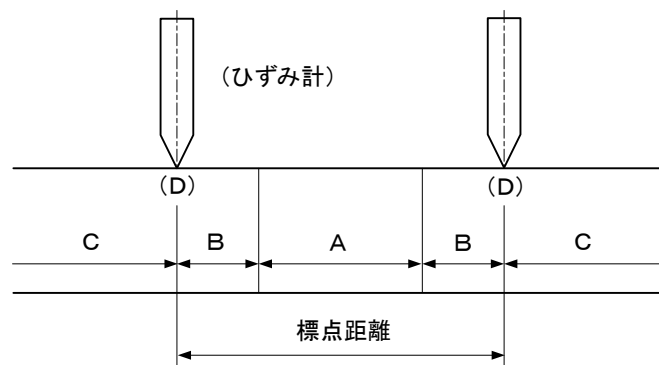


図 2.4-14 破損位置の明示方法(母材及び溶接金属)

付録

- Appendix 2.1-1 溶接に関する用語の定義
- Appendix 2.1-2 FBR 金属材料試験データシートの例(引張)
- Appendix 2.2-1 FBR 金属材料試験データシートの例(クリープ)
- Appendix 2.3-1 FBR 金属材料試験データシートの例(リラクセーション)
- Appendix 2.4-1 FBR 金属材料試験データシートの例(疲労試験・クリープ疲労試験)
- Appendix 2.4-2 ナトリウム中疲労試験におけるひずみ校正方法
- Appendix 2.5-1 FBR 金属材料試験データシートの例(内圧クリープ試験)

This is a blank page.

Appendix 2.1-1 溶接に関する用語の定義(共通) (1/3)

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、圧力又はその両方によって一体にする操作。
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)	EBW	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)	SMAW	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、溶接ワイヤー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、タングステン又はタング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、溶接ワイヤーを電極とする溶接。
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。

Appendix 2.1-1 溶接に関する用語の定義(共通) (2/3)

No.	用 語	標準記号	定 義
12	シールドガス (Shielding Gas)	—	溶接中にアークと熔融金属とを覆い、空気が溶接雰囲気へ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、冶金学的性質、機械的性質などの変化を生じた、熔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。
17	溶接金属 (Weld Metal)	—	溶接部の一部で、溶接中に熔融凝固した金属。
18	熔融部 (Fusion Zone)	—	溶接部の中で母材が熔融した部分。
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、母材間の境界又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つ又はそれ以上のパスからなる溶接金属の層。

Appendix 2.1-1 溶接に関する用語の定義(共通) (3/3)

No.	用 語	標準記号	定 義
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)	—	溶接又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)あ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)	—	オーステナイト系ステンレス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 (Post Weld Heat Treatment)	PWHT	溶接後、溶接部又は溶接構造物に行う熱処理。

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible][illegible]

Appendix 2.4-2 ナトリウム中疲労試験におけるひずみ校正方法

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、アーム型ひずみ計で測定したツバ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、ツバ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校正を行う。

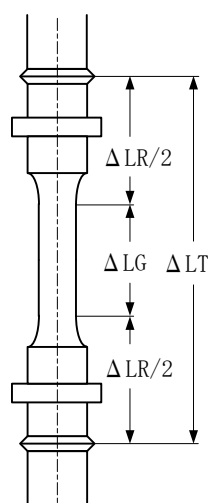
- (1) ツバ間の総変位 ΔLT は、ツバ間の平行部及び平行部以外のそれぞれの全変位 ΔLG 、 ΔLR によって次式のように表せる(付図 1 参照)。

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

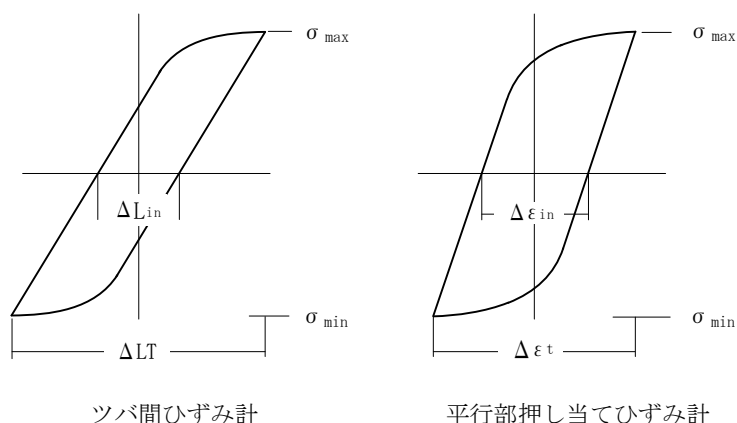
$$\Delta LT_{Air} = \Delta LG_{Air} + \Delta LR_{Air}$$

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。

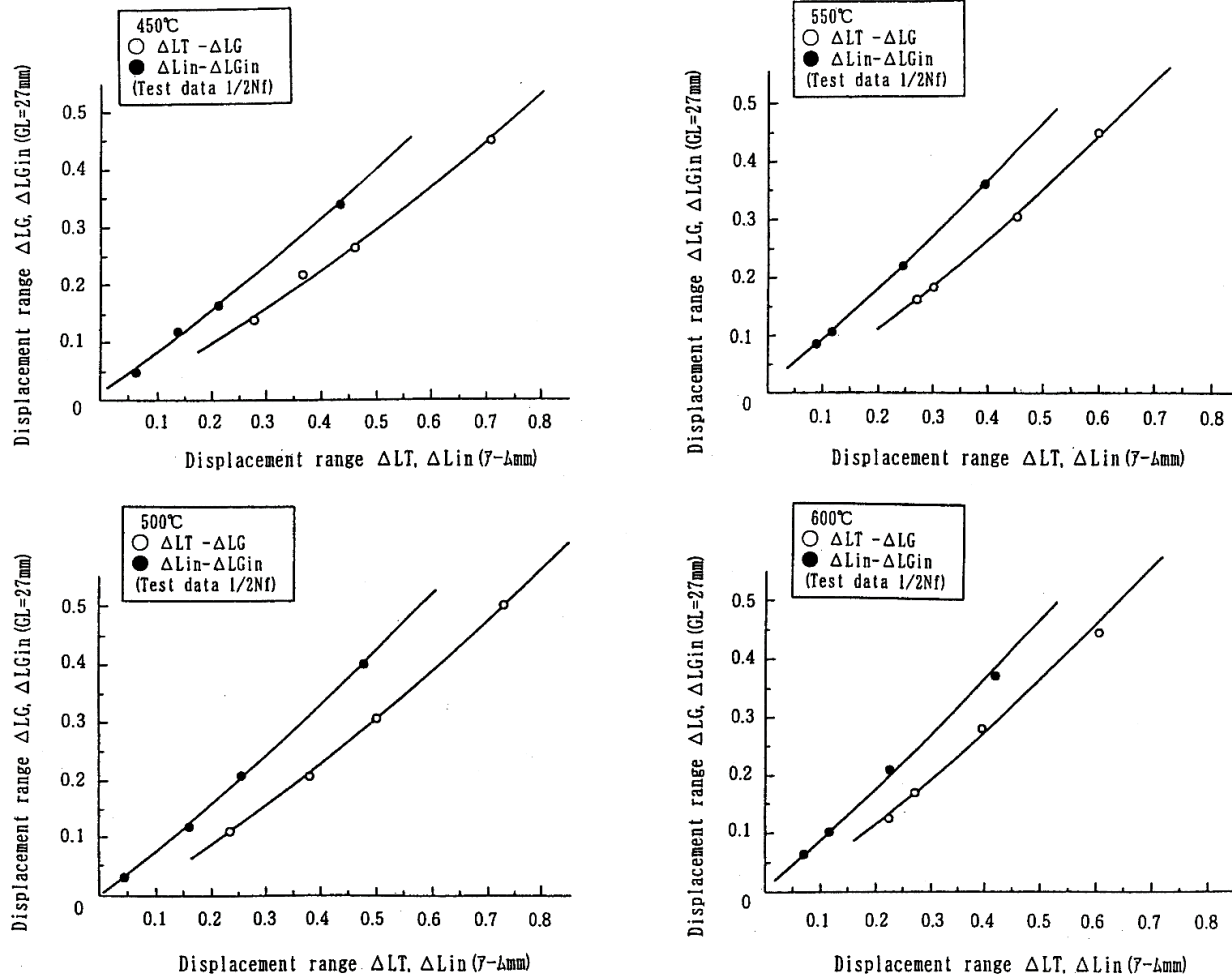
- (2) 試験片材料、温度及び負荷条件が同一であれば、試験材の履歴は別として単に試験環境が、大気中とナトリウム中とで異なるだけならば、その応力-ひずみ挙動はほぼ同等であるため、一定のツバ間変位 ΔLT の繰返しに対して、ナトリウム中と大気中の ΔLG と ΔLR は、それぞれほぼ同じ値にあると考えられる($\Delta LG_{Na} = \Delta LG_{Air}$ 、 $\Delta LR_{Na} = \Delta LR_{Air}$)。
- (3) これにより、大気中試験から得られた ΔLT_{Air} と ΔLG_{Air} の関係に対し、ナトリウム中試験において破損回数 N_f 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ツバ間の非弾性変位 ΔL_{in} (付図 2 参照)を用いて、(3)項同様大気中の $\Delta L_{in} - \Delta LG_{in}$ 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校正曲線を示す。



付図 1 試験片



付図 2 応力ひずみ波形図



付図3 改良 9Cr-1Mo 鋼のひずみ校正曲線(例)

Appendix 2.5-1 FBR 金属材料試験データシートの例(内圧クリープ試験)

試験雰囲気							
試験片番号	形状 (外径×肉厚) [mm]	試験温度 (°C)	設定周応力 (MPa)	破断時間 (hr)	ふくれ率 (%)	破損形態 [V, F, P]	破断位置
(例)M2	Φ6.9×0.4t	1000	45.0	136	0.89	F	B②-③

