

JAERI - M

88-041

液体ヘリウム温度における
金属構造材料の引張試験方法
(第一草案)

1988年3月

中嶋 秀夫

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 榎高野高速印刷

液体ヘリウム温度における金属構造材料の引張試験方法
(第一草案)

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部
中嶋秀夫

(1988年2月1日受理)

液体ヘリウム温度における材料試験は、標準試験方法が存在しないため、常温の方法の延長線上で行なわれてきている。しかし、超電導コイルをはじめとする極低温技術の進展に伴い、極低温構造材料のデータ・ベース確立のためにも、液体ヘリウム温度での標準試験方法の早急な確立が望まれている。そのような背景の中、日米核融合協定に基づき、米国専門家が原研に滞在し、両者共同で極低温引張試験及び極低温破壊靱性試験方法の標準化作業が進められた。そして、両者の議論、合意の上、標準試験方法の案がまとめられた。ここに記すのは、日本文としてまとめたもので、米国側は担当者名で英文としてまとめた。米国では、本案が既に ASTM に提出され、規格化が進められている。この日本文は、これに対し、JIS 規格化の基本案とすることを目的としている。

PROPOSED STANDARD METHOD FOR TENSILE TESTING OF
STRUCTURAL ALLOYS AT LIQUID HELIUM TEMPERATURE

Hideo NAKAJIMA

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1988)

There are no standard methods of a cryogenic material testing at present. It is absolutely required to standardize standard test method at a cryogenic temperature in order to establish a data base of cryogenic structural materials for large superconducting magnet. For this purpose evaluations of cryogenic structural materials are conducted by using the test method based on a room temperature standard. The standardization of a cryogenic tensile test method and a cryogenic fracture toughness test method was performed under the US-Japan fusion collaboration. A US scientist stayed in JAERI both for experimental work and for standardization discussion. An agreed basis by both side was established. This JAERI-M report is the draft of cryogenic tensile test standard in Japanese which is expected to be used for the JIS (Japanese Industrial Standard) application discussion. A similar draft in English was drafted by a US scientist and was already proposed to ASTM (American Society for Testing and Materials) committee.

Keywords: Liquid Helium Temperature, Tensile Testing, Standard Method,
Cryogenic Structural Alloy, US-Japan Collaboration, ASTM, JIS

目 次

1. 適用範囲	1
2. 引用及び関連規格	1
3. 用語の意味	2
4. 意義と適用	3
5. 試験装置	4
6. 試験片採取	7
7. 試験片	8
8. 試験方法	9
9. 報告書	1 1
謝 辞	1 2
参考文献	1 3

Contents

1. Scope	1
2. Applicable Documents	1
3. Definitions	2
4. Significance and Use	3
5. Apparatus	4
6. Sampling	7
7. Test Specimens	8
8. Procedures	9
9. Report	1 1
Acknowledgment	1 2
References	1 3

1. 適用範囲

この規格は、液体ヘリウム温度（4 K（-196℃））における金属材料の引張試験方法について規定する。

(1) この規格は、液体ヘリウム温度特有のセレーション、断熱加熱、ひずみ速度の影響等を考慮した引張試験について規定すると共に、液体ヘリウム温度での試験に必要な極低温治具、小型試験片の使用について規定する。

(2) この規格は、液体ヘリウム中における、クロスヘッド速度一定（変位制御）での引張試験について規定する。荷重制御による試験及び高ひずみ速度での試験はこの限りではない。

(3) この規格は、降伏応力、引張強さ、伸び、絞りの測定方法について規定する。弾性定数測定は、この限りではないが、ASTM E 111を参考とする。

(4) この規格で取り扱う単位は、国際単位系（SI）とする。

(5) この規格は、極低温試験に関する安全性の問題について規定しない。安全性についての配慮は実験者の責任において行われるものとする。液体ヘリウムあるいは他の極低温の液体の取扱いについては、文献1を参照のこと。

2. 引用及び関連規格

(1) 日本工業規格

JIS B 7721	引張試験機
JIS B 7728	材料試験機用荷重検定器
JIS G 0303	鋼材の検査通則
JIS G 0306	鍛鋼品の検査通則
JIS G 0567	鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法
JIS Z 2201	金属材料引張試験片
JIS Z 2241	金属材料引張試験方法
JIS Z 8103	計測用語
JIS Z 8401	数値の丸め方

(2) ASTM規格

ASTM A 370 Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel

1. 適用範囲

この規格は、液体ヘリウム温度（4 K（-196℃））における金属材料の引張試験方法について規定する。

(1) この規格は、液体ヘリウム温度特有のセレーション、断熱加熱、ひずみ速度の影響等を考慮した引張試験について規定すると共に、液体ヘリウム温度での試験に必要な極低温治具、小型試験片の使用について規定する。

(2) この規格は、液体ヘリウム中における、クロスヘッド速度一定（変位制御）での引張試験について規定する。荷重制御による試験及び高ひずみ速度での試験はこの限りではない。

(3) この規格は、降伏応力、引張強さ、伸び、絞りの測定方法について規定する。弾性定数測定は、この限りではないが、ASTM E 111を参考とする。

(4) この規格で取り扱う単位は、国際単位系（SI）とする。

(5) この規格は、極低温試験に関する安全性の問題について規定しない。安全性についての配慮は実験者の責任において行われるものとする。液体ヘリウムあるいは他の極低温の液体の取扱いについては、文献1を参照のこと。

2. 引用及び関連規格

(1) 日本工業規格

JIS B 7721	引張試験機
JIS B 7728	材料試験機用荷重検定器
JIS G 0303	鋼材の検査通則
JIS G 0306	鍛鋼品の検査通則
JIS G 0567	鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法
JIS Z 2201	金属材料引張試験片
JIS Z 2241	金属材料引張試験方法
JIS Z 8103	計測用語
JIS Z 8401	数値の丸め方

(2) ASTM規格

ASTM A 370 Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel

	Products (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 01. 04)
ASTM E 4	Practices for Load Verification of Testing Machines (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 03. 01, 04. 02, 07. 01, and 08. 03)
ASTM E 6	Definition of Terms Relating to Methods of Mechanical Testing (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 03. 01 and 08. 03)
ASTM E 8	Methods for Tension Testing of Metallic Materials (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 01. 02, 02. 01, 02. 02, 02. 03, and 03. 01)
ASTM E 8M	Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Metric (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01)
ASTM E 29	Recommended Practice for Indicating Which Places of Figures Are to Be Considered Significant in Specified Limiting Values (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 02. 03, 03. 01, 03. 03, 03. 05, and 14. 02)
ASTM E 83	Practice for Verification and Classification of Extensometers (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01)
ASTM E 111	Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01)

3. 用語の意味

この規格で用いる主な用語の意味は、JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) によるほか、次のとおりとする。

(1) 極低温治具

極低温雰囲気です試験片に負荷するための治具の総称。一例を Fig. 1 に示す。

(2) デュワー

極低温の液体を貯めるための真空断熱槽を持った容器。

(3) 断熱加熱

	Products (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 01. 04)
ASTM E 4	Practices for Load Verification of Testing Machines (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 03. 01, 04. 02, 07. 01, and 08. 03)
ASTM E 6	Definition of Terms Relating to Methods of Mechanical Testing (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 03. 01 and 08. 03)
ASTM E 8	Methods for Tension Testing of Metallic Materials (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 01. 02, 02. 01, 02. 02, 02. 03, and 03. 01)
ASTM E 8M	Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Metric (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01)
ASTM E 29	Recommended Practice for Indicating Which Places of Figures Are to Be Considered Significant in Specified Limiting Values (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vols. 02. 03, 03. 01, 03. 03, 03. 05, and 14. 02)
ASTM E 83	Practice for Verification and Classification of Extensometers (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01)
ASTM E 111	Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01)

3. 用語の意味

この規格で用いる主な用語の意味は、JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) によるほか、次のとおりとする。

(1) 極低温治具

極低温雰囲気です試験片に負荷するための治具の総称。一例を Fig. 1 に示す。

(2) デュワー

極低温の液体を貯めるための真空断熱槽を持った容器。

(3) 断熱加熱

引張試験による塑性変形によって発生した熱が、周囲の冷媒へ即座に伝わるできないために起こる試験片の内部加熱。

(4) 補正平行部の長さ

試験片全長を用いる伸び測定の際に基準となる、補正された試験片平行部の長さ。平行部の長さに肩部でのひずみを補正した長さを加えた長さとなる。

(5) 軸ひずみ

試験片の中心軸から等距離にある反対側の点で測定されたひずみの平均値

(6) 曲げひずみ

軸ひずみと試験片表面で測定されたひずみとの差。曲げひずみの値は、試験片の軸方向、周方向に沿ってそれぞれ変化する。

(7) 最大曲げひずみ

試験片の平行部で測定された曲げひずみの最大値。この値は、試験片の長手方向の二点における周方向の三点のひずみから計算される。

4. 意義と適用

(1) 一般に、引張試験は一方向引張応力の下での材料の強度と延性についての情報を与える。この情報は材料開発、材料の比較及び選択、そして品質管理に役立つばかりでなく、構造物の設計においても役立つ。

(2) 4 K の変位制御で行われた金属の引張試験の荷重-時間、荷重-変位曲線にはセレーションが見られる。セレーションは不安定な塑性流動の開始と停止の繰り返しによって起こる。不安定塑性流動（不連続な降伏）は、公称ひずみ速度より高いひずみ速度において起こり、局所的にかなりの放熱を引き起こす。4 K でセレーションを起こしているオーステナイト系ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。

(3) 液体ヘリウム中での試験中、試験片の温度は一定であるとは限らない。不連続降伏の時の断熱加熱により、試験片の温度は 4 K よりも一時的に上昇する (Fig. 2 参照)。この挙動は試験片サイズ、試験速度により変化する。しかし、試験条件を変えても内部加熱を除去することはできない (文献 3 参照)。そこで、不連続降伏の起こらないような高い温度で測定された機械的特性は、液体ヘリウム中での金属の機械的特性（特に、引張強さ、伸び、絞り）としての意味を持たない。

(4) 4 K における、材料の不安定な塑性変形間の応力-ひずみの関係は、荷重制御か変位制御かに依存する (文献 4 参照)。この規格は、通常の方法による材料の特性評価について規定することを目

引張試験による塑性変形によって発生した熱が、周囲の冷媒へ即座に伝わるできないために起こる試験片の内部加熱。

(4) 補正平行部の長さ

試験片全長を用いる伸び測定の際に基準となる、補正された試験片平行部の長さ。平行部の長さに肩部でのひずみを補正した長さを加えた長さとなる。

(5) 軸ひずみ

試験片の中心軸から等距離にある反対側の点で測定されたひずみの平均値

(6) 曲げひずみ

軸ひずみと試験片表面で測定されたひずみとの差。曲げひずみの値は、試験片の軸方向、周方向に沿ってそれぞれ変化する。

(7) 最大曲げひずみ

試験片の平行部で測定された曲げひずみの最大値。この値は、試験片の長手方向の二点における周方向の三点のひずみから計算される。

4. 意義と適用

(1) 一般に、引張試験は一方向引張応力の下での材料の強度と延性についての情報を与える。この情報は材料開発、材料の比較及び選択、そして品質管理に役立つばかりでなく、構造物の設計においても役立つ。

(2) 4 K の変位制御で行われた金属の引張試験の荷重-時間、荷重-変位曲線にはセレーションが見られる。セレーションは不安定な塑性流動の開始と停止の繰り返しによって起こる。不安定塑性流動（不連続な降伏）は、公称ひずみ速度より高いひずみ速度において起こり、局所的にかなりの放熱を引き起こす。4 K でセレーションを起こしているオーステナイト系ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。

(3) 液体ヘリウム中での試験中、試験片の温度は一定であるとは限らない。不連続降伏の時の断熱加熱により、試験片の温度は4 K よりも一時的に上昇する（Fig. 2 参照）。この挙動は試験片サイズ、試験速度により変化する。しかし、試験条件を変えても内部加熱を除去することはできない（文献3参照）。そこで、不連続降伏の起こらないような高い温度で測定された機械的特性は、液体ヘリウム中での金属の機械的特性（特に、引張強さ、伸び、絞り）としての意味を持たない。

(4) 4 K における、材料の不安定な塑性変形間の応力-ひずみの関係は、荷重制御か変位制御かに依存する（文献4参照）。この規格は、通常の方法による材料の特性評価について規定することを目

的としているので、クロスヘッドの変位制御試験について規定する。従って、荷重制御に近い負荷を受けるような構造物を設計する際は、得られたデータを注意して取り扱う必要がある。

5. 試験装置

(1) 試験機

引張試験に用いる試験機は、JIS B 7721 (引張試験機) による。

(2) 極低温治具の設計

金属材料の強度は、室温から4Kに温度が下がることにより、しばしば2～3倍になる。室温と同じサイズの試験片を4Kでも用いる場合は、極低温治具、試験片に大きな負荷がかかる。通常の試験機の能力は10 ton のものが多く、この能力内で試験するためには、7.(2).1) に示す標準試験片に適合する極低温治具を設計する必要がある。

(3) 極低温治具用材料

フェライト鋼を初めとする多くの材料は、4Kで脆化する。極低温治具、つかみ具は脆化を起こさない高靱性、高強度の低温用材料で作られねばならない。例えば、オーステナイト系ステンレス鋼 (JIS 304LN)、マルエージング鋼 (錆びないようにニッケル・メッキした200, 250,あるいは300グレード)、ELIグレードのチタン合金 (Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2.5Sn) が極低温治具用材料として使用されている。

(4) 心合せ

1) 単一試験片用治具

試験片の曲げひずみを抑えるため、試験装置は、つかみ装置取付部を結ぶ直線を正しく鉛直にして使用しなければならない。通常の単一試験片用治具では、最大曲げひずみが軸ひずみの10%を越えないように、心合せをしなければならない。曲げひずみの計算は、無負荷の状態と試験装置の最大能力負荷の状態で行うこととする。

(注1) この規定により、試験治具の曲げひずみに及ぼす影響は最小になると思われる。調整された試験治具においても、試験片での僅かな変化のために、数パーセントの範囲の曲ひずみがお発生する可能性がある。

2) 複数試験片用治具

この種の極低温治具の心合せは、使用されるつかみ装置の形式に依存する。最大曲げひずみが測定され、報告されるべきである。

3) 検定試験

試験治具の心合せの程度は室温と4Kで検定されるべきである。治具の心合せの程度の検定を行う

的としているので、クロスヘッドの変位制御試験について規定する。従って、荷重制御に近い負荷を受けるような構造物を設計する際は、得られたデータを注意して取り扱う必要がある。

5. 試験装置

(1) 試験機

引張試験に用いる試験機は、J I S B 7721 (引張試験機) による。

(2) 極低温治具の設計

金属材料の強度は、室温から4Kに温度が下がることにより、しばしば2～3倍になる。室温と同じサイズの試験片を4Kでも用いる場合は、極低温治具、試験片に大きな負荷がかかる。通常の試験機の能力は10 ton のものが多く、この能力内で試験するためには、7.(2).1) に示す標準試験片に適合する極低温治具を設計する必要がある。

(3) 極低温治具用材料

フェライト鋼を初めとする多くの材料は、4Kで脆化する。極低温治具、つかみ具は脆化を起こさない高靱性、高強度の低温用材料で作られねばならない。例えば、オーステナイト系ステンレス鋼 (J I S 304LN)、マルエージング鋼 (錆びないようにニッケル・メッキした200, 250, あるいは300グレード)、ELIグレードのチタン合金 (Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2.5Sn) が極低温治具用材料として使用されている。

(4) 心合せ

1) 単一試験片用治具

試験片の曲げひずみを抑えるため、試験装置は、つかみ装置取付部を結ぶ直線を正しく鉛直にして使用しなければならない。通常の単一試験片用治具では、最大曲げひずみが軸ひずみの10%を越えないように、心合せをしなければならない。曲げひずみの計算は、無負荷の状態と試験装置の最大能力負荷の状態で行うこととする。

(注1) この規定により、試験治具の曲げひずみに及ぼす影響は最小になると思われる。調整された試験治具においても、試験片での僅かな変化のために、数パーセントの範囲の曲ひずみがお発生する可能性がある。

2) 複数試験片用治具

この種の極低温治具の心合せは、使用されるつかみ装置の形式に依存する。最大曲げひずみが測定され、報告されるべきである。

3) 検定試験

試験治具の心合せの程度は室温と4Kで検定されるべきである。治具の心合せの程度の検定を行う

ための試験片は、極低温試験で使用される試験片と同じ形状を持ち、試験片中心ができるだけ一致したものであることが望まれる。また、塑性変形が平行部で起こってはならない。かなりの剛性と強度を持った検定試験片が必要となる場合が多い。試験法は、次による。

① 丸棒試験片における最大曲げひずみは、試験片の長手方向の二点における周方向の三点のひずみから計算する。ひずみは試験片の平行部の周方向に等しい間隔で貼られた抵抗線ひずみゲージにより測定する。長手方向の二点はできるかぎり遠い方が良いが、肩部からは直径分だけ離れなくてはならない。

② 矩形断面を有する試験片では、ひずみは四つの側面の中心で測定し、薄板の場合は二つの幅の広い側面の外側の端近くで測定する。

③ 試験片自体の影響を除去するため、180度、試験片を回転させて測定を繰り返す。しかし、この場合、つかみ装置、負荷装置等は元の位置を保つようにする。最大曲げひずみと試験片の軸方向のひずみは、同じ場所での二つの読みの平均として計算する。

4) ひずみの平均手法

ひずみが試験片の片側のみで測定された場合に、荷重軸が狂っていると、引張試験の際に、小さなひずみ領域での誤差の原因になる。これを防ぐためには、二つの伸び計あるいはひずみゲージを試験片の反対側に付け、両側のひずみを平均すると良い。

(5) つかみ装置の構造

4Kで用いられるつかみ装置の構造は、試験片の形式によって決められる。つかみ装置は、基本的にJIS B 7721 (引張試験機)による。

(6) 寸法測定器

マイクロメータあるいは、試験片の寸法を測定するために用いられる測定器は、少なくとも、測定すべき寸法の最小桁の1/2の精度で測定できるものでなければならない。

(7) 極低温装置

1) 極低温治具

極低温治具は液体ヘリウムを保持する構造を有していなければならない。一般に、既存の試験機のための極低温治具は注文製作であるが、それらは市販のデュワーに適應するものとした方が良い。極低温治具には装置の心合せをするための機能を持たせた方が良い。一回の冷却で複数の試験片を試験するための治具である、ターレット・ディスクを含んだいくつかの実用的設計例を参考文献5-9に示す。

2) デュワー

FRPデュワーに比べ安価であり、ガラス・デュワーに比べ安全なステンレス製のデュワーが推奨される。デュワー構造は、外側に液体窒素、内側に液体ヘリウム槽を持つダブルデュワー構造と液体ヘリウム槽のみのシングルデュワー構造に分けられる。後者は、一般に短時間の試験に対して用いられる。

3) 周辺機器

デュワーや液体ヘリウムを液送するためのトランスファー・チューブは真空断熱層を持っているので、真空ポンプが必要となる。その他に、液送のための加圧ガスや予冷のための液体窒素が必要となる。試験後、ヘリウムは大気放出されるか、ガスとして回収され再液化される。ヘリウムの回収、再液化装置においては、液化装置だけでなく、精製装置を初めとする周辺システムが重要な構成要素となる。

(8) 温度維持と液体ヘリウム液面計

1) 熱電対

液体ヘリウム中の試験では、熱電対による試験片温度の測定を必要としない。

2) 液面計

熱電対による試験片温度の測定は必要ないが、試験中、試験片が完全に液体ヘリウム中にあることを保証するため、液面計により液体ヘリウムの液面を監視しなければならない。液面計には、カーボン抵抗を使用した on-off 型の液面計や超電導線を使用した連続型の液面計がある。

(9) ひずみゲージ

1) ひずみゲージの選定

4 K でのひずみを測定するために、試験片表面に直接取り付けられたひずみゲージを使用する。製造会社で推奨する、ゲージ材料、ベース材料、接着剤の組み合わせが選定される。また、これらは経験に従って選定される場合もある。

2) 測定法

試験片のひずみは、アクティブ・ダミー 2 ゲージ法、あるいは、温度補償をするための 3 線式 1 ゲージ法により測定する。3 線式 1 ゲージ法による接続例を Fig. 3 に示す。ゲージ抵抗は 120, 350 Ω が代表的である。4 K でのジュール発熱を防止するために、1~2 V の低いブリッジ電圧を使用する。

3) 校正

室温におけるひずみゲージの校正は、抵抗変化を用いた電氣的校正により行う。4 K での校正では、電氣的校正において抵抗の温度依存を考慮すべきである。温度の関数であるゲージ・ファクターは製造会社や文献により提供される。

(10) ひずみゲージ式伸び計

1) 形式

4 K で使用されるひずみゲージ式伸び計には、自作のものと市販のものがある。一例は、ホイー

トストン・ブリッジを形成する四つのひずみゲージが貼られたビーム型のクリップ・ゲージである（文献11）。試験片の標点距離の伸びは、試験片の平行部に固定されたピンに狭んだ伸び計により測定する。

2) 特性

伸び計で0.2%耐力を測定する際は、ASTM E 83で規定されているClass B-2伸び計を使用する。伸び計は、E 83で規定されている感度と精度を満足するものでなくてはならない。また、4Kにおいても、精度保証のための試験を行うべきである。可能であれば、伸び計は試験片の平行部に直接取り付けようとする。

3) 校正

適当な装置により、室温と4Kで伸び計を校正する必要がある。4Kでの校正は、校正装置の軸の先に取り付けた液体ヘリウム中の伸び計の変位を、室温側に取り付けたマイクロメータにより測定することにより行う。4Kでの校正が一度行われ、精度、直線性、再現性が実証されたなら、各々の試験前に、室温のチェックのみを行えば良い。しかし、損傷の疑いがある場合、修理をした場合などは、4Kでの校正を行われなければならない。

(1) キャパシタンス式伸び計

ひずみのモニタのためにキャパシタンス式伸び計を使用しても良い（文献10）。同心柱型のもは、ひずみレンジが広く、変位に線形な出力、感度調整を有している。平行板型のもは高い感度を有しているが、出力は変位に線形でなく、容量への双曲線的存在を補正しなければならない。

6. 試験片採取

(1) 素材

引張試験片は、製品本体を代表する特性を測定できる状態の素材から、採取されなければならない。また、採取時の加工による影響は、あってはならない。

(2) 採取位置

素材の特定の位置から採取した試験片での結果は、全体を代表していない場合がある。試験片は素材の最も代表的と思われる位置から採取しなければならない。採取位置は、次による。

① 40 mmあるいはそれ以下の厚さ、直径、及び大きさを持つ製品における採取位置は、厚さ、直径、及び大きさの中心とする。

② 40 mmあるいはそれ以上の厚さ、直径、及び大きさを持つ製品における採取位置は、表面から1/4の所とする。

(3) 試験片形状

試験片の形状寸法は、素材の代表的特性を測定できるように、試験機的能力(5.(2))を考慮して決定する。

トストン・ブリッジを形成する四つのひずみゲージが貼られたビーム型のクリップ・ゲージである（文献11）。試験片の標点距離の伸びは、試験片の平行部に固定されたピンに狭んだ伸び計により測定する。

2) 特性

伸び計で0.2%耐力を測定する際は、ASTM E 83で規定されているClass B-2伸び計を使用する。伸び計は、E 83で規定されている感度と精度を満足するものでなくてはならない。また、4Kにおいても、精度保証のための試験を行うべきである。可能であれば、伸び計は試験片の平行部に直接取り付けようとする。

3) 校正

適当な装置により、室温と4Kで伸び計を校正する必要がある。4Kでの校正は、校正装置の軸の先に取り付けた液体ヘリウム中の伸び計の変位を、室温側に取り付けたマイクロメータにより測定することにより行う。4Kでの校正が一度行われ、精度、直線性、再現性が実証されたなら、各々の試験前に、室温のチェックのみを行えば良い。しかし、損傷の疑いがある場合、修理をした場合などは、4Kでの校正を行われなければならない。

(1) キャパシタンス式伸び計

ひずみのモニタのためにキャパシタンス式伸び計を使用しても良い（文献10）。同心柱型のもは、ひずみレンジが広く、変位に線形な出力、感度調整を有している。平行板型のもは高い感度を有しているが、出力は変位に線形でなく、容量への双曲線的存在を補正しなければならない。

6. 試験片採取

(1) 素材

引張試験片は、製品本体を代表する特性を測定できる状態の素材から、採取されなければならない。また、採取時の加工による影響は、あってはならない。

(2) 採取位置

素材の特定の位置から採取した試験片での結果は、全体を代表していない場合がある。試験片は素材の最も代表的と思われる位置から採取しなければならない。採取位置は、次による。

- ① 40 mmあるいはそれ以下の厚さ、直径、及び大きさを持つ製品における採取位置は、厚さ、直径、及び大きさの中心とする。
- ② 40 mmあるいはそれ以上の厚さ、直径、及び大きさを持つ製品における採取位置は、表面から1/4の所とする。

(3) 試験片形状

試験片の形状寸法は、素材の代表的特性を測定できるように、試験機的能力(5.(2))を考えて決定する。

(4) 試験片採取方向等

試験片の採取方向は、JIS Z 0303（鋼材の検査通則）、0306（鍛鋼品の検査通則）に準ずる。

7. 試験片

(1) 一般事項

1) 形状・寸法

試験片形状、寸法及び寸法に対する許容値は、JIS Z 2201（金属材料引張試験片）による。

2) サイズ

薄板や線材製品からの試験片は、その断面積が小さいので、通常の試験機の能力で十分試験できる。しかし、厚板あるいは棒製品からの試験片は、その断面積が大きいため、試験機の能力を越えないで試験するためには、縮小断面を持つ形状に加工される必要がある。

(2) 丸棒試験片

JIS Z 2201（金属材料引張試験片）の定形試験片では、高強度鋼の場合、4Kで大きな荷重を必要とし、通常の試験機能力10 tonでは能力不足である。

1) 標準試験片

通常の試験機の荷重制限に適應するように、JIS Z 2201（金属材料引張試験片）の直径7mmの14A号丸棒試験片を標準試験片とする。この試験片の寸法及び公差はTable 1に示されている。この試験片のつかみ部はねじ、あるいは、肩部であり、加工精度で5.(4)・1)を満足するようにする。

2) 拡張試験片

上記の標準試験片が適用できないときは、JIS Z 2201（金属材料引張試験片）の規定にしたがって他の直径を選ぶことができる。これらの試験片の形状は、標準試験片と同じとする（本規格のFig. 4参照）。

3) サブサイズ試験片

直径6 mm以下のサブサイズ試験片を使用する場合は、加工、表面仕上げ、心合せ、断面内の結晶粒の数等の影響が無視できないので、試験片製作時及び試験時において特別の注意を払わなければならない。

(4) 試験片採取方向等

試験片の採取方向は、JIS Z 0303（鋼材の検査通則）、0306（鍛鋼品の検査通則）に準ずる。

7. 試験片

(1) 一般事項

1) 形状・寸法

試験片形状、寸法及び寸法に対する許容値は、JIS Z 2201（金属材料引張試験片）による。

2) サイズ

薄板や線材製品からの試験片は、その断面積が小さいので、通常の試験機の能力で十分試験できる。しかし、厚板あるいは棒製品からの試験片は、その断面積が大きいため、試験機の能力を越えないで試験するためには、縮小断面を持つ形状に加工される必要がある。

(2) 丸棒試験片

JIS Z 2201（金属材料引張試験片）の定形試験片では、高強度鋼の場合、4Kで大きな荷重を必要とし、通常の試験機能力10 tonでは能力不足である。

1) 標準試験片

通常の試験機の荷重制限に適應するように、JIS Z 2201（金属材料引張試験片）の直径7mmの14A号丸棒試験片を標準試験片とする。この試験片の寸法及び公差はTable 1に示されている。この試験片のつかみ部はねじ、あるいは、肩部であり、加工精度で5.(4):1を満足するようにする。

2) 拡張試験片

上記の標準試験片が適用できないときは、JIS Z 2201（金属材料引張試験片）の規定にしたがって他の直径を選ぶことができる。これらの試験片の形状は、標準試験片と同じとする（本規格のFig. 4参照）。

3) サブサイズ試験片

直径6 mm以下のサブサイズ試験片を使用する場合は、加工、表面仕上げ、心合せ、断面内の結晶粒の数等の影響が無視できないので、試験片製作時及び試験時において特別の注意を払わなければならない。

8. 試験方法

(1) 試験片のマーキング，測定

1) 標点距離

伸び測定用の標点は試験片の平行部の適当な位置に，通常の方法である，ポンチ，けがき，インクにより記す。標点距離は，直径の5倍を標準とする。もし，他の標点距離を用いた場合は報告書に明記すること。標点間距離は0.05 mmの単位で測定する。

(注2) 低延性材料の場合，平行部のポンチやケガキマークにより応力集中を起し，これらの場所で破壊することがある。これを避けるため，平行部に塗ったインクを，試験片を回しながら，ナイフの刃で削って印を付ける方法も可能である。JIS G 0567 (鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法)により，試験片の肩部に印を付けるか試験片の全長を用いて伸びを測定しても良い。

2) 平行部

平行部の長さ l_0 と補正平行部の長さ l_0' は0.05 mmの単位で測定する。

3) 断面積

平行部の断面積はJIS Z 2241 (金属材料引張試験方法)により測定する。

(2) 試験片の取り付け

極低温治具へ試験片を取り付ける際は，その後の過程において，ひずみゲージあるいは伸び計の配線が引っ張られないように注意し，配線には十分な余裕を持たせて試験片を取り付ける。

(3) 座りと心合せ

つかみ装置が固定されていない場合，例えば，球形のベアリングで支えられている場合などは，室温で座りや心合せをチェックすることにより，ベアリング表面での食い違いや摩擦を防ぐようにすること。心合せの調整過程において，負荷は試験材料の比例限の1/3以下に保つこと。

(4) 冷却方法

試験片，クリップゲージ，極低温治具等の中の氷は，異常負荷や液送ラインの詰まりの原因となるので，冷却前に極低温治具を加圧空気ドライヤーで完全に乾かすことによって，湿気を取り除く。次に，極低温治具に液体窒素を液送し77 Kまで予冷する。77 Kの平衡温度に到達した後，全ての液体窒素をデューワーから追い出し，液体ヘリウムを試験片とつかみ装置が完全に浸かるまで液送する。4 Kで試験装置が熱的平衡へ達した後，試験を始める。試験片は，試験中は完全に液体ヘリウム中になければならない。

(注3) ガスヘリウムの熱伝達特性は液体ヘリウムよりも劣っている。そこで、液体ヘリウム雰囲気は不連続降伏の間の試験片加熱効果を最小にするために必要不可欠である。

(5) 試験速度

1) 公称ひずみ速度

4 Kでは、断熱加熱が起こるため、引張特性は試験速度の影響を非常に受ける。そこで、クロスヘッド速度制御試験が規定される。不連続降伏が起きたとき、実際の速度は正確にコントロールあるいは保持されないため、公称ひずみ速度が規定されねばならない。公称ひずみ速度はクロスヘッド速度を平行部長さで除した商として計算される。

2) 限界試験速度

試験中、公称ひずみ速度は $1 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ を越えてはならない。これ以上の速度は、過度の試験片温度上昇の原因となるので、4 Kの材料特性の測定においては適用できない。

3) 速度変化

一般に、不連続降伏の開始するひずみは、ひずみ速度の減少と共に増加する。もし、与えられた材料の最初のセレーションが0.2%塑性変形の近くで起こるならば、降伏応力の測定において支障のないような速度に落として試験することが望まれる。この時には、かなり遅いひずみ速度が降伏応力決定に使われるので、試験を終了するにはより高いひずみ速度でその後試験をする必要がある。降伏応力の1/2の応力まではどんな速度でも良いが、その後はひずみ速度が $1 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ を越えてはならない。

(6) 機械的性質の測定

1) 荷重-伸び(ひずみ)曲線法

降伏応力を測定するためには、少なくとも0.2%塑性ひずみまでの荷重-伸び(ひずみ)曲線が必要である。この場合、伸び、ひずみは、それぞれ伸び計、ひずみゲージにより測定する。0.2%オフセット法による降伏応力の測定法はJIS Z 2241(金属材料引張試験方法)の6.4(1)による。0.2%オフセット線が不連続降伏による荷重降下の線と交差する場合は、その時の降伏応力としては、交点の直前の最も高い応力を報告することとする(Fig. 5参照)。

2) 荷重-時間曲線法

4 Kにおいて、0.2%オフセット法を荷重-時間曲線に適用し降伏応力を求めることは、商業試験を目的とし、かつ、注文者と製造業者の合意の下でのみ許されるものとする。もし、この方法が使われたなら、報告書で明記されなければならない。

(注4) 4 Kでの荷重-時間曲線は、負荷当初は非線形であり、荷重-伸び曲線に比べ規則性に劣る。また、試験片の伸びと時間の関係は、極低温治具中の温度分布に依存して変化する。結果として、荷

重一時間曲線法から求めた降伏応力は荷重一伸び曲線法により求めたものよりも精度的に劣る。

3) 引張強さ

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 6.5 により求める。

4) 伸び

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 6.8 により求める。

5) 絞り

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 6.11 により求める。

6) 報告された試験データの数値の丸め方

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 及び JIS Z 8401 (数値の丸め方) による。

7) 再試験

必要であれば, JIS G 0303 (鋼材の検査通則) の 4.4 に準じて再試験する。

9. 報 告 書

(1) 試験結果報告書には, 次の項目を記載しなければならない。

① 試験材料

製造業者, 製造過程, 冶金学的情報を含んで試験された材料について記載すること。

② 試験片

試験片の採取位置, 採取方向を記載すること。また, 断面積, 肩部の半径, 平行部の長さ, 補正平行部の長さ (必要であれば) を含んだ試験片寸法を記載すること。

③ ひずみ速度

クロスヘッド速度と公称ひずみ速度を記載すること。もし, 速度を変更した場合は降伏前と後の両方を記載すること。

④ 機械的特性

降伏応力, 引張強さ, 降伏応力の決定法について記載すること。伸び計が使用された場合は, 伸びの測定方法と伸び計の取り付け位置も記載すること。また, 伸びとその計算方法, 丸棒試験片における標点距離と直径の比, 絞りも記載すること。

⑤ 添付データ

4Kでのヤング率, 室温の機械的性質, 試験材料の平均結晶粒径, 極低温治具を含めた試験機のコンプライアンス等を記載すること。

⑥ 繰り返し試験

繰り返し試験が行われた場合は, 試験片数, 機械的特性の平均値, 測定値のばらつきについて記載すること。

重-時間曲線法から求めた降伏応力は荷重-伸び曲線法により求めたものよりも精度的に劣る。

3) 引張強さ

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 6.5 により求める。

4) 伸び

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 6.8 により求める。

5) 絞り

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 6.11 により求める。

6) 報告された試験データの数値の丸め方

JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) 及び JIS Z 8401 (数値の丸め方) による。

7) 再試験

必要であれば, JIS G 0303 (鋼材の検査通則) の 4.4 に準じて再試験する。

9. 報 告 書

(1) 試験結果報告書には, 次の項目を記載しなければならない。

① 試験材料

製造業者, 製造過程, 冶金学的情報を含んで試験された材料について記載すること。

② 試験片

試験片の採取位置, 採取方向を記載すること。また, 断面積, 肩部の半径, 平行部の長さ, 補正平行部の長さ (必要であれば) を含んだ試験片寸法を記載すること。

③ ひずみ速度

クロスヘッド速度と公称ひずみ速度を記載すること。もし, 速度を変更した場合は降伏前と後の両方を記載すること。

④ 機械的特性

降伏応力, 引張強さ, 降伏応力の決定法について記載すること。伸び計が使用された場合は, 伸びの測定方法と伸び計の取り付け位置も記載すること。また, 伸びとその計算方法, 丸棒試験片における標点距離と直径の比, 絞りも記載すること。

⑤ 添付データ

4Kでのヤング率, 室温の機械的性質, 試験材料の平均結晶粒径, 極低温治具を含めた試験機のコンプライアンス等を記載すること。

⑥ 繰り返し試験

繰り返し試験が行われた場合は, 試験片数, 機械的特性の平均値, 測定値のばらつきについて記載すること。

⑦ サブサイズ試験片

サブサイズ試験片が使用された場合は、試験片加工、表面状態、心合せについて取られた措置について記載すること。また、試験材料の結晶粒径を記載すること。

⑧ その他

材料挙動、試験記録、破壊様式と位置についての異常について記載すること。

謝 辞

極低温材料試験方法の標準化作業に当り、御指導、御鞭達いただいた森茂副理事長、苫米地頭所長、田中正俊部長に感謝致します。

日米核融合協定に基づき、原研に滞在し、実験、議論に参加した米国標準局(NBS)R. L. Tobler 氏に深く感謝致します。さらに、議論に参加して下さった東北大学、高橋秀明教授、同庄子哲雄助教授、原研超電導磁石研究室、島本進室長、同吉田清研究員各位に深く感謝の意を表します。最後に、学会発表等を通じ、有意義な御助言をいただいた国内の極低温材料研究者の方々に感謝の意を表します。

⑦ サブサイズ試験片

サブサイズ試験片が使用された場合は、試験片加工、表面状態、心合せについて取られた措置について記載すること。また、試験材料の結晶粒径を記載すること。

⑧ その他

材料挙動、試験記録、破壊様式と位置についての異常について記載すること。

謝 辞

極低温材料試験方法の標準化作業に当り、御指導、御鞭達いただいた森茂副理事長、苫米地頭所長、田中正俊部長に感謝致します。

日米核融合協定に基づき、原研に滞在し、実験、議論に参加した米国標準局(NBS)R. L. Tobler氏に深く感謝致します。さらに、議論に参加して下さった東北大学、高橋秀明教授、同庄子哲雄助教授、原研超電導磁石研究室、島本進室長、同吉田清研究員各位に深く感謝の意を表します。最後に、学会発表等を通じ、有意義な御助言をいただいた国内の極低温材料研究者の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Cryogenics Safety Manual—A Guide to Good Practice, 2nd Ed., Mechanical Engineering Publications, London, 1982.
- (2) Basinski, Z. S., "the Instability of Plastic Flow of Metals at Very Low Temperatures," Proceedings of the Royal Society, Vol. A240, 1957 pp. 229-242.
- (3) Ogata, T., Ishikawa, K., and Nagai, K., "Effects of Strain Rate on the Tensile Behavior of Stainless Steels, Copper, and an Aluminum Alloy at Cryogenic Temperatures," Tetsu-to-Hagane, Vol. 71, No. 10, 1985, pp. 122-129.
- (4) Ogata, T. and Ishikawa, K. "Time-dependent Deformation of Austenitic Stainless Steels at Cryogenic Temperatures," Cryogenics, Vol. 26, 1986, pp. 365-369.
- (5) Schwartzberg, F. R., "Mechanical Property Testing Techniques for the Cryogenic Temperature Range," in: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 8, Plenum Press, New York, 1963, pp. 608-623.
- (6) Evans, D., Simmonds, G. E., and Stapleton, G. B., "Improved Facility for Determining Mechanical Properties of Materials in Liquid Helium," in: Proceedings, Fourth International Cryogenic Engineering Conference, IPC Science and Technology Press, Guildford, Surrey, England, 1972, pp. 331-337.
- (7) Hartwig, G. and Wuchner, F., "Low Temperature Mechanical Testing Machine," Review of Scientific Instruments, Vol. 46, 1975, pp. 481-485.
- (8) Novikov, N. V. "Mechanical Property Measurement Techniques of Structural Materials at Cryogenic Temperatures," in: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 22, Plenum Press, New York, 1977, pp. 113-118.
- (9) Horiuchi, T., Shimada, M., Fukutsuka, T., and Tokuda, S., "Design and Construction of an Apparatus for Testing Materials at Cryogenic Temperatures," in: Proceedings, Fifth International Cryogenic Engineering Conference, IPC Science and Technology Press, Guildford, Surrey, England, 1977, pp. 465-468.
- (10) Sparks, L. L., "Temperature, Strain, and Magnetic Field Measurements," in: Materials at Low Temperatures, R. P. Reed and A. F. Clark, eds., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983.

- (11) Read, D. T. and Tobler, R. L., "Mechanical Property Measurements at Low Temperatures," in: Advances in Cryogenic Engineering-Materials, Vol. 28, Plenum Press, New York, 1982, pp. 17-28.

Table 1 Recommended Standard Specimen for Liquid Helium Temperature Tests

Nominal Diameter (mm)	7
G, gauge length (mm)	35 ± 0.1
D, diameter (mm)	7 ± 0.1
R, fillet radius (mm)	>15
A, reduced section (mm)	42

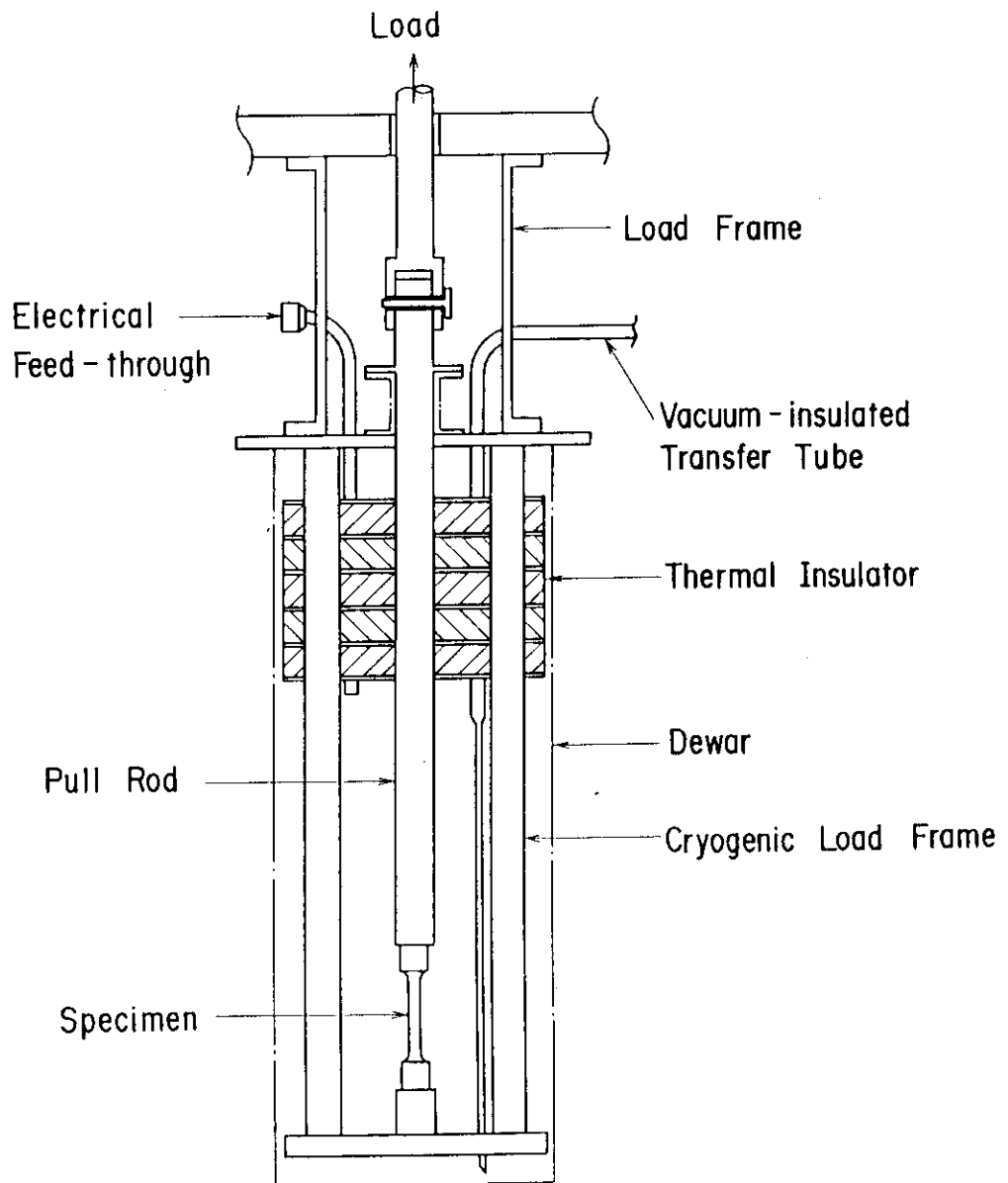


Fig. 1 Example of a Cryogenic Apparatus for Tensile Testing at 4 K

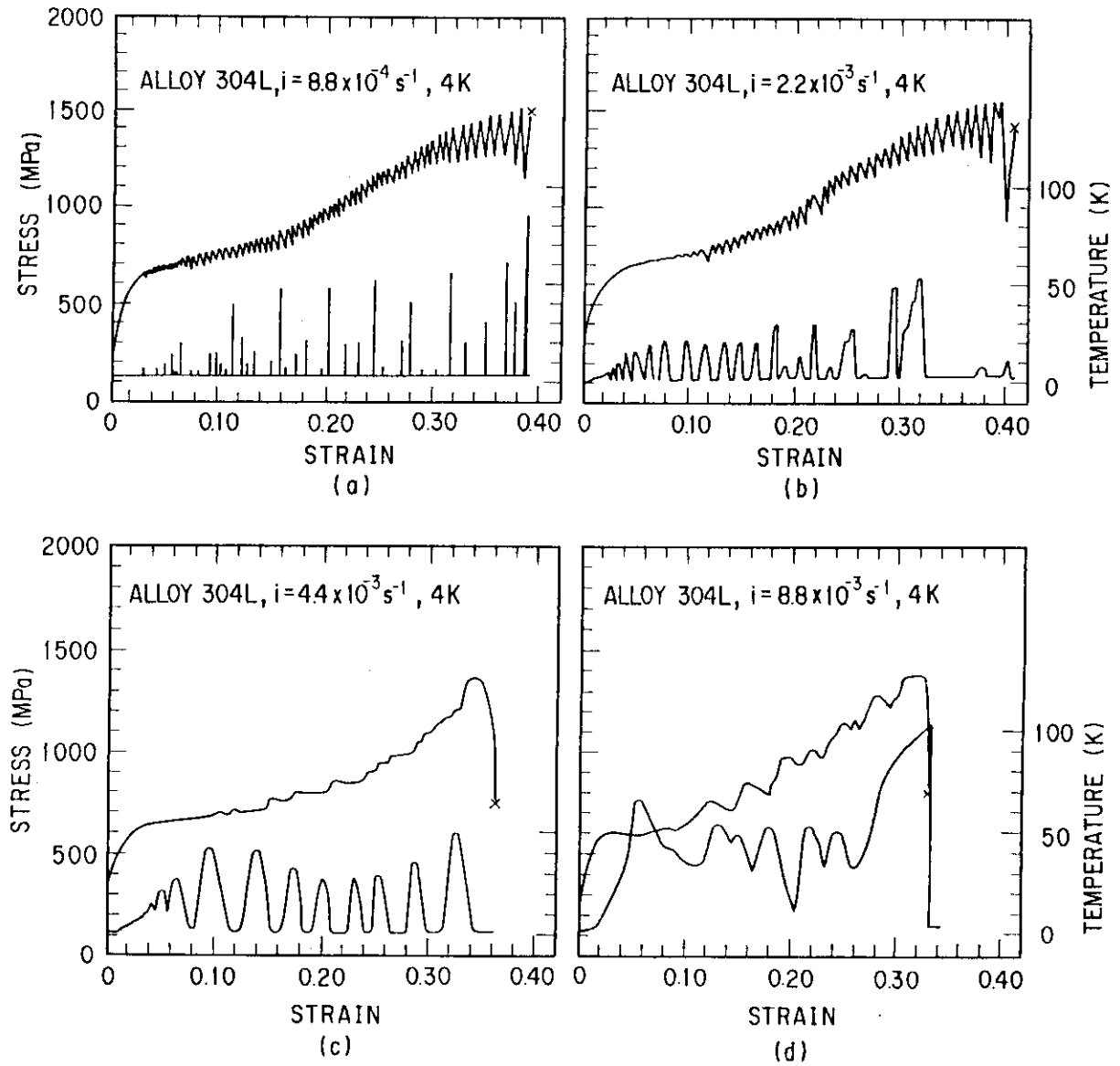


Fig. 2 Engineering Stress-Strain Curves for AISI 304L Austenitic Stainless Steel at 4 K

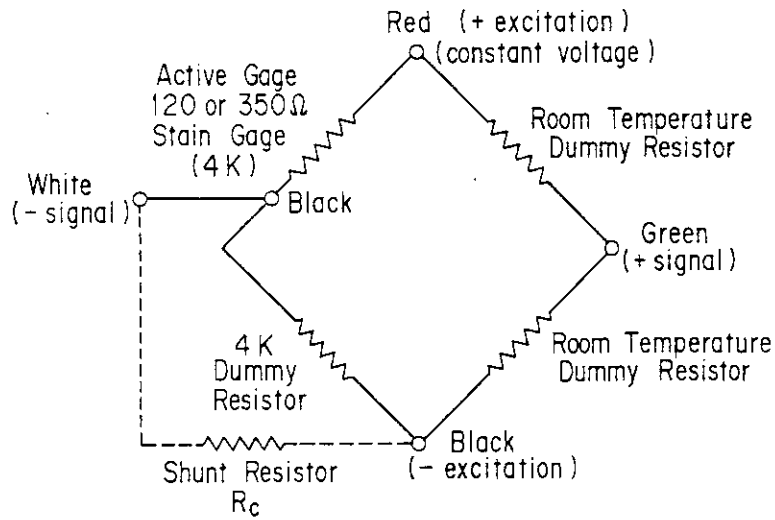


Fig. 3 Example of a Strain Gauge Wiring Method for Cryogenic Tests

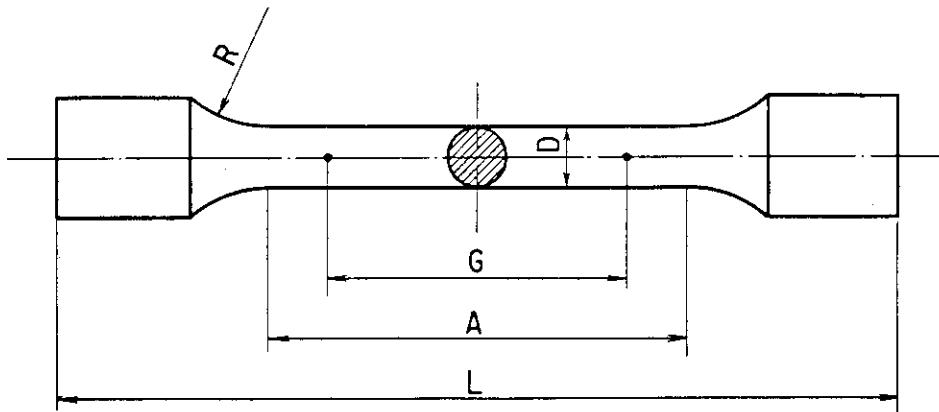


Fig. 4 Round Bar Specimen Configuration (See Table 1)

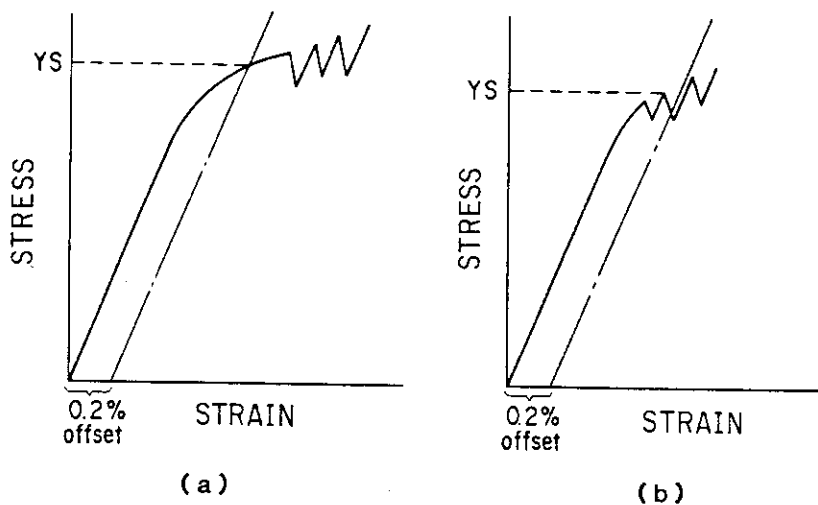


Fig. 5 Stress-Strain Diagram for Determination of Yield Strength by the Offset Method: (a) Serrations occurring after 0.2% Strain; (b) Serrations occurring before 0.2% Strain