極低温における材料試験

津 谷 和 男

金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒 2-3-12

(1977年 9 月28日受理)

Materials Testing at Cryogenic Temperatures

Kazuo TSUYA

National Research Institute For Metals
2-3-12, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

(Received Sept. 28, 1977)

Synopsis :

This paper outlines materials testing at cryogenic temperatures. The evaluation of standard mechanical properties of domestic materials is essential for designing cryogenic devices which are necessary for the development¹⁾ of fusion reactors, magnetic suspension trains, superconducting generators and so on. Typical examples of equipment and techniques used by various researchers in the field of cryogenic testing are described.

1. 極低温における材料試験の必要性和問題点

わが国における先端技術の開発は、その基盤の技術として極低温用構造材料の研究開発を必要とするものが多い。たとえば、宇宙開発における液酸液水ロケットのほか、超電導利用に関するものでは、核融合炉、MHD 発電、超電導発電機、磁気浮上列車、などがある。

このような用途に用いるための材料の確性試験には、液体水素温度、液体ヘリウム温度における材料試験装置および試験法の確立が必要となる。液体窒素温度までの温度域での材料試験は、引張試験や衝撃試験などの短時間試験に関する限り、常温での試験とほぼ同様に実施されており、技術上の問題点はあまりない。しかしながら、ヘリウム温度での材料試験では、限られた量の液体ヘリウムを有効に利用して試験片を試験温度まで能率的に冷却すること、一回の冷却でなるべく多くの材料試験を行なうこと、材料試験中に所要の

計測を支障なく行ないうること（たとえば、疲れ試験における亀裂伝播速度の測定）、など各種の技術的問題点がある。

これらのうち、最も本質的で重要なものは試験片の冷却方法であり、装置面ではクライオスタットの設計が問題になる。試験片の冷却方法には、冷媒に浸漬する方法、細孔より冷媒を噴射する方法、蒸発する冷媒ガスとヒータの組合せにより所定の温度に冷却する方法、などがある。均一な試験温度を得るという点では浸漬法がすぐれているが、比較的多量の冷媒を必要とし、そのうえ試験温度が冷媒の沸点に限られる欠点がある。

負荷用のフレームを含めたクライオスタットの設計には、次のような諸因子について考慮することが必要である²⁾。(1)デュワーおよび負荷用フレームを試験温度まで冷却するために取り除かなければならない、初期冷却のための熱量、(2)定常状態での試験中にクライオスタット中に侵入する熱量、(これは、フレームを介しての熱伝導によるもの、デュワーの壁を通し

での熱侵入, および試験片の塑性変形による発熱, の総和である) (3) フレームに要求される強度とコンプライアンス (剛性の逆数)

いま所要の材料試験の種類が単純な引張試験で, 試験時間も短い場合は, (2) の定常状態でのクライオスタットへの熱侵入, および(3)のコンプライアンスは余り考えなくてもよい。しかしながら(1)の初期冷却の際に取除く熱量を減少させるために強度が高く, 密度と比熱の小さい材料を荷重用フレームに用いることが望ましい。

これに対して, 高サイクル疲労試験のように試験時間が長い場合は, 初期冷却で取除く熱量を小さくすることは勿論であるが, (2)の定常状態での熱侵入も減少させる必要がある。したがって, 荷重用フレームの比熱, 密度および熱伝導率を最小にしなければならない。

しかし, フレームによる熱侵入を小にするためにその断面積を減少させると, コンプライアンスは増大し, 疲れ試験の可能な最大周波数の減少 (すなわち試験時間の増大) をまねくことになる。結局, 高サイクル疲労試験の場合に, フレームの設計強度と所要のコンプライアンスを確保して, しかも定常状態におけるクライオスタットへの熱侵入を小さくするためには, 荷重用フレームの材料選択が重要な問題になる。このような材料としては, 強度と熱伝導率の比のすぐれた FRP やチタン合金などが有用と考えられている。

つぎに, 極低温における材料試験で求められる材料特性値は, 単純な引張性質にとどまらず, 破壊力学にもとづいた諸特性値, すなわち破壊靱性値 (K_{Ic}) や, 疲労亀裂成長速度 (da/dN) の測定が要求されている。これは K_{Ic} や da/dN などが, 破壊力学を通じて機器の設計に直接役立つためである。近年発行された「超電導機器用材料ハンドブック」²⁾ には, このような特性値が収集されているが, 国産材料についての標準データは皆無に近い状態である。したがって, 極低温における材料試験装置の整備に当っては, 母材や溶接部の K_{Ic} や da/dN を評価しうる装置を設置することが望ましい。

2. 引張試験

極低温引張試験装置の設計に当って考慮すべき項目としては, (1) 試験片の冷却方法, (2) 荷重の荷重方法, (3) 複式試験法の利用, (4) 試験時の計測, などがあげられる。試験片の冷却は, 図1のように液体へ

図1 引張試験用クライオスタット (NBS, Boulder)

図2 引張試験用クライオスタット (東芝)

リウム中に浸漬するもの³⁾, ヒータによる加熱とクライオスタットの減圧により試験温度の変化を可能としたもの⁴⁾ (図2), および図3のように冷媒となるガスを試験片に噴射する方法⁵⁾, などがある。図1の装置では既製のガラスデューワー2個が使用されている。試験に先立って両デューワーに液体窒素が満たされる。内側のデューワーの液体窒素は内蔵された引張用フレームが十分に冷却されたのちヘリウムガスで置換され, 続いて液体ヘリウムが注入される。1回の試験に必要なヘリウムの量は, 試験時間が2時間以下の場合 3~7l である。なおこの試験機の容量は10,000 Lb (約5.5t) 以上である。

図2は, クライオスタット底部のヒータによりヘリウムを蒸発させて試験片を冷却する形式のもので, 液

図3 引張試験用クライオスタット
(単結晶試験用)

体ヘリウムの沸点以上の試験温度が必要なときは、試験片の側方のヒータが使用される。また -269°C 以下の試験の場合には、真空ポンプによりクライオスタットの内圧を変化させて、所要の試験温度を得ている。

この装置のクライオスタットの定常状態でのヘリウム蒸発速度は 1.03l/hr である。

図3のクライオスタットは、冷却用のヘリウムガスを試験片に噴射して冷却する形式のものである。この装置の中心は試験片を内蔵する熱交換室である。試験片の周囲には細孔を有する外筒と内筒（いずれもステンレス鋼製）が設置され、外筒にはヒータが巻かれている。液体ヘリウム容器からトランスファーチューブで運ばれた冷たいヘリウムガスは内管の細孔から試験片に噴射されるが、その温度はヒータで調節される。クライオスタットを 25K まで冷却するのに必要な液体ヘリウムは約 1l であり、試験片を 50K に保つのに必要なガス量は毎分 10l （液体ヘリウムで 0.7l ）である。この装置は単結晶の引張試験用に作られたものである。

つぎに、試験片の負荷の方法については、図1および図2のように、ロードセルにつながるプルロッド

と、クロスヘッドに固定された円筒状のフレームを用いるのが一般的である。しかし、図3のように、クライオスタットの上下からプルロッドを挿入するものもある。後者は通常クライオスタットを試験機から取り外さずに試験片が交換できるように設計されているので取扱いが便利であるが、浸漬型の冷却法をとるときは、プルロッドをクライオスタットの底部から挿入する際のシール等の問題点を有するほか、冷媒の使用量も多くなる。いずれの場合も負荷用フレームは強度が大で熱伝導率、密度、比熱の小さな材料を使ってクライオスタットへの熱侵入を防ぐことが望ましいが、わが国では通常オーステナイト系 18-8 ステンレス鋼が使われている。米国の装置では Ti-6Al-4V 合金や FRP のように、強度/熱伝導率の比のすぐれた材料が積極的に用いられている。

ヘリウム温度での引張試験の場合、液体ヘリウムの大半は、デュワーおよび負荷用フレームの冷却に使用されるので、一回の冷却での試験本数を増やすことが試験能率の向上のために望ましい。図2の装置では3本のプルロッドが挿入されており、ロードセルとプルロッドをつなぎ変えることにより、一回の冷却で3本の引張試験が可能である。このような複式試験装置では、プルロッドの数を増すと熱の流入が増大するので、試験本数には限界がある。図4の装置⁶⁾は、円板上にセットされた12本の引張試験片を順次回転させて一本のプルロッドで引張るもので、能率よく引張試験を行なうことができる。また図5の試験片⁷⁾は照射下の引張試験に用いられるものであるが、試験片のピン穴を

図4 複式引張試験用クライオスタット（神鋼）

図 5 複式引張試験片

長くすることにより、重ね合せた板状試験片に順次荷重が加えられるように工夫されている。

極低温の引張試験では、試験片の伸びの計測が行なわれることは少ないが、図 3 の装置では低温域外に設置された伸び計 (LVDT) により試験片の伸びが検出されている。

以上はいずれも冷媒として液体ヘリウムを使用した引張試験であるが、液体水素を冷媒として使用する場合は、爆発防止のための安全対策が重要である。作業者と装置が同電位になるよう接地してスパークを防止すること、クライオスタットのリークの検知を十分行なうこと、放出された水素ガスを排気管により屋外に

排出すること、実験室内の換気を十分に行なうこと、などが必要である。

3. 衝撃試験および破壊靱性試験

衝撃試験は材料の靱性を評価するために最も一般的に使用されている方法である。液体窒素までのシャルピー試験は、冷媒の浴中に浸漬した試験片を手早く試験機に移すことによって、規格に定められた 5 秒以内に試験を行なうことが可能である。しかしながら、77 K 以下では金属の比熱が減少するため、冷媒から取り出した後の試験片の温度上昇が急速で、試験が行ないにくくなる。試験片の温度上昇の主要な原因は、試験片表面で空気が液化して潜熱を放出するためと考えられている。それゆえ、真空またはヘリウム雰囲気グローブボックス内で試験片を冷却してシャルピー試験を行なう装置⁹⁾が考案されているが、装置が複雑で操作が面倒になる欠点がある。

このようなグローブボックスを用いる方法に代るものとして、最近、極低温における簡便なシャルピー試験法が提案されている。この方法は、図 6 に示すように、試験片を熱絶縁の良い箱に入れ、液体ヘリウムを注入しながら試験を行なうものである⁹⁾。絶縁材はスタイロフォームで、液体ヘリウムが流れやすいように表面に溝がつけられている。絶縁材でカバーされたシャルピー試験片は、液体ヘリウムの入口と出口をもつプラスチックの箱に挿入され、シャルピー試験機のアンビル上に置かれる。この箱に液体ヘリウムを流し込むことにより、試験片は 5~6 K まで急速に冷却され、液体ヘリウムの供給を止めない限りこの温度を維持す

図 6 極低温衝撃試験法説明図 (University of California, Berkeley)

ることができる。衝撃試験は試験片を箱に入れたままの状態で行なわれるが、プラスチックの箱は極低温ではきわめて脆く、シャルピーエネルギーの計測にはほとんど影響しない。試験に必要なヘリウム量は、最初の一本には5~6lを要するが、続く試験ではトランスファーチューブが冷えているため、一本当たり2~3lとなる。この方法の利点は、既存の衝撃試験機が手を加えることなく使えて操作が簡単なこと、試験片の温度が安定して均一であること、などである。

前述のように、シャルピー試験は靱性の評価に一般的に用いられているが、材料に要求されるシャルピーエネルギー値の決定は、破壊事故を起こした材料のエネルギー値などから経験的に決定されている。したがって、構造物の破壊事故防止の観点からは、破壊力学にもとづいた破壊靱性値を靱性の指標として用いることが合理的である。破壊靱性試験片の大きさは材料の強度によって変るが、超強力鋼のように強度水準が極度に高いもの以外は、シャルピー試験片より大型になる。この試験片の形状および計測技術以外は、破壊靱性試験は引張試験の場合と技術的に大差はない。

破壊靱性試験用のクライオスタットは、後述の図10に示すような構造¹⁾で、引張試験用クライオスタットと本質的に変りがない。図10の破壊靱性測定装置の容量は100 kN (約10.2t) であるが、さらに大型の5.3 MN (約540t) の装置¹⁰⁾も宇宙関係で用いられている。この装置には液体水素用クライオスタットが取付けられている。そのほか、前述のシャルピー試験同様、クライオスタットを使用しない方法¹¹⁾も用いられている。図7は、液体ヘリウムを冷媒とする破壊靱性試験の方法を示したもので、試験片はいわゆるCT型試験片*が用いられており、これがスタイロフォームでおおわれプラスチックの箱に挿入される。箱には液体ヘリウムの注入口のほか、負荷用のピン穴、熱電対用の穴、および変位測定に用いるクリップゲージ用の四角な穴がけられている。試験片の大きさは、幅50.8 mm、厚さ17.8 mmで、亀裂長さは25.4 mmである。液体ヘリウムの注入により試験片の温度は3~4分以内に5~6Kに達する。なお一個の試験片の冷却に必要なヘリウムの量は5~7lである。

以上のようなクライオスタットを使わない材料試験

* 片側切欠を有する破壊靱性測定用試験片で、CTは compact tension の略である。曲げ試験片を用いる場合に比べて試料が少量で済むという利点がある。

図7 極低温破壊靱性試験片 (University of California, Berkeley)

法は既存の試験機のみで実施が可能のため簡便であるが、使用したヘリウムの回収は困難である。従って米国のようにヘリウムが安価に使用しうる国では有利な方法であるが、日本の場合には工夫の余地があるものと考えられる。

4. 疲労試験

疲労試験は一般に試験時間が長くなるため、はじめに述べたようにクライオスタットへの外部からの熱侵入を小にする必要があるほか、冷媒のクライオスタット

図8 引張および疲労試験用クライオスタット (NASA, Lewis Research Center)

トへの自動補給を考えなければならない。また試験片の冷却方式は、論文として報告された装置はほとんどが冷媒に浸漬する方式をとっている。

図8に示されたクライオスタット¹²⁾は、上下からプルロッドを挿入する形式のもので、デュワーとロッドの間にはペローが用いられている。試験片は試料室内で液体ヘリウムに浸漬して冷却される。試料室はその中央部で低融点合金を用いて接合されている。試験片の交換の際には、装置に組込まれたヒータにより低融点合金をとかして試料室を2つに分離し、ダブルペローを利用して開放される。また、試料室とクライオスタット外壁の間の真空室中には、銅製の輻射シールドがあり、液体窒素で冷却される。なおこの装置で用い

られる試験片は、直径 6.35 mm の砂時計型のものである。このようなロッドを上下から挿入する形のクライオスタットはほかにも報告されているが、下部のチャックが振動するために、次に述べる方法のものに比べて冷媒の消費量がやや多いといわれる。

つぎに図9のクライオスタット¹³⁾は、負荷用のプルロッドと円筒を上方から挿入するものである。この装置は、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) の疲労特性を試験するために設計されたもので、冷媒には液体水素が用いられる。クライオスタット内部の真空空間におかれた負荷用円筒は断熱用のアルミ箔で包まれている。この円筒の内側には液体水素の容器が設置され、底部には固定側のチャックが取付けられている。

また上部チャックはプルロッドを介して試験機の駆動装置に連結されている。クライオスタットの大部分は 304 ステンレス製だが、上部チャックと冷媒容器には熱侵入を小にするため、チタンが用いられている。なおこの装置に用いられる試験片は、厚さ 0.125 吋、幅 0.35 吋、全長 9 吋である。

この方式のものは、わが国でも作られている。試験機容量 ± 1 t の装置¹⁴⁾で、液体ヘリウムの自然蒸発量 0.55 l/hr と報告され、疲れ試験用クライオスタットとしてこのタイプがすぐれていることが認められている。

図10は、疲労試験および破壊靱性試験のために作られたクライオスタット¹⁵⁾で、基本的には図9と同一形式のものである。しかし、クライオスタットへの熱侵入を小にするために、使用材料に対する配慮がなされている。

固定側の負荷用フレームの上部は、厚さ 6.35 mm の GFRP の管でできており、下部には厚さ 3.18 mm の 304 ステンレスが用いられている。またプルロッドにはチタン合金が用いられ、チャックはマルエージ鋼製である。つぎにデュワーは、図のように液体ヘリウム用と液体窒素用の二重構造になっている。内側のヘリウム用デュワーは、真空断熱とアルミ被覆したマイラーによる断熱が併用されており、デュワーの材料には GFRP

図9 疲労試験用クライオスタット (Narmco Research and Development, A Division of Telecomporation)

図10 疲労試験用クライオスタット
(NBS, Boulder)

が使用されている。また液体窒素用のデュワーには、ガラス繊維とエポキシ樹脂で作られた多孔性の FRP が用いられている。このクライオスタットは容量 100 kN (約 10.2t) の試験機と組合せて用いられるが、初期冷却に必要な液体ヘリウム量は 7~11l であり、静的荷重下での液体ヘリウムの定常的な消費量は 0.05~0.1l/hr であった。また疲労試験の際には、試験片の発熱や冷媒の攪拌のため、消費量はこの 5 倍位に増大する。このクライオスタットで試験しうる試験片の最大寸法は、厚さ 3.81 cm までのいわゆる CT 型試験片である。

以上のようなクライオスタットに組合せられる疲労試験機の形式は種々あり、制御方式も異なっている。図 8 の装置のとり付けられた試験機は、容量 $\pm 9,000\text{N}$ (約 0.92t) の電気油圧サーボ疲労試験機で、33 Hz で歪振幅は 1.22 mm である。この試験機は、試験片の直径変化を検出し、これを制御対象として歪制御により疲労試験を行なうものである。繰返し速度は、低サイクル高歪領域での試験の場合の 0.1 Hz から、高サイクル低歪域の 10 Hz までの範囲を有しているが、高サイクル側で応力-歪関係が弾性的なときは荷重制御が行なわれている。歪検出用には低温用に較正され

図11 100 kN 疲労試験機の特徴

た差動トランスが使用される。つぎに、図 9 のクライオスタットを用いる装置には、5000 Lb (約 2.25t) の機械駆動式試験機が用いられている。その繰返し速度は 25 Hz で、 10^6 サイクルの試験の所要時間は約 11 時間である。また同形式のクライオスタットを有する別の装置では、容量 $\pm 1\text{t}$ 、周波数 5~25 Hz の電気油圧サーボ試験機を用い 10^6 回までの荷重制御試験が行なわれている。図 10 のクライオスタットと組合せられた試験機は、前述のように 100 kN (約 10.2t) の容量の電気油圧サーボ試験機で、試験は 25 Hz、荷重制御で行なわれた。このように最近の装置では電気油圧サーボ方式のものが使われることが多いが、図 10 の装置ではアクチュエータの変位と繰返し速度の関係は図 11 のようになる¹⁾。この図から明らかなように、高歪域の試験では繰返し速度が小になり、低歪域の試験では大になる。

クライオスタットへの冷媒の補給は、カーボン抵抗液面計により液面の位置を検出して冷媒の自動補給を行なうのが普通の方法である。冷媒として液体水素を用いるときも装置本体は変わらないが、この場合は漏洩した水素の爆発を防止するために、装置を保護カバーでおおい大量の空気を導入して水素が停留するのを防止している¹³⁾。

このほか、プルロッドの可動部分のシールなども疲労試験用クライオスタット製作上の問題点である。上下からロッドを挿入する型のものでは、図 9 のようにベローが用いられるが、図 9 および図 10 の装置では O リングシールが用いられる。長時間試験の場合、O リ

ングの材質によっては摩耗などによるリングの損傷が起ることがある¹³⁾。

はじめに述べたように、疲労試験では亀裂伝播速度 da/dN の測定が求められることが多い。図 10 の装置では、クリップゲージを使用して亀裂開口量を測定し亀裂長さを算出しているが、極低温の冷媒中で信頼性のすぐれた歪ゲージの開発も重要な課題である。

5. 極低温における材料試験の現況

各種の極低温機器の設計に当って、構造材料の強度に関するデータの収集は必須のものであるが、わが国における極低温材料試験の現況は、米国に比べると十分とはいえない。

文献に公表されたものから、わが国における極低温材料試験装置の設置状況を事例的にひろってみる。引張試験装置は、東芝⁴⁾、日立¹⁵⁾、神鋼⁶⁾、金材技研¹⁶⁾、などにあり、いずれも液体ヘリウム用のクライオスタットを容量 10 t までのインストロン型試験機にとりつけて試験が行なわれている。また疲労試験装置は東芝に容量 1 t のものがある¹⁴⁾。金材技研以外の民間会社には設置された装置は、いずれも MHD 発電や磁気浮上列車など超電導に関連した研究開発のため整備されたものと思われる。また極低温における破壊靱性試験については、わが国での経験は乏しいが、金材技研では溶接継手などの破壊靱性試験を行なうため、容量 10 t の装置を設置した。また航空宇宙技術研究所では、ロケットのタンク用構造部材の破壊靱性を求めるため、20 t 極低温構造要素特性試験装置を完成した¹⁷⁾。なお液体ヘリウム温度などにおける衝撃試験については、わが国ではほとんど報告されていない。

これに対して米国では、各種の極低温材料試験が進められている。引張試験装置は NBS の Boulder 支所³⁾、NASA の Lewis Research Center などの国家機関のほか、Martin 社、General Dynamics 社などの民間会社にも設置されている。またシャルピー試験は、Martin 社などでグローブボックス中に試験機を入れる方法⁹⁾ が用いられるが、最近ではカリフォルニア大学で、試験片をカプセルに入れる前述の方法⁹⁾ が考案されている。また同様の方法は、破壊靱性試験¹¹⁾ にも利用されている。一方、NBS の Boulder 支所¹⁾ および Lewis Research Center¹²⁾ では、クライオスタットを使い浸漬法で試験片を冷却して、破壊靱性を測定している。

疲れ試験も引張試験と同様に、NBS の Boulder 支

所¹⁾、NASA の Lewis Research Center¹²⁾ で実験が行なわれているほか、Martin 社¹⁵⁾、General Dynamics 社¹⁹⁾ などの民間会社でも疲労試験装置が設置、使用されている。

以上のように、日米両国の極低温における材料試験の現況を比較すると、米国では宇宙開発の過程で液体水素温度における試験経験が蓄積され、これが近年、超電導関係の研究開発に生かされている。しかも、これらの材料試験結果は、標準データとして各種のハンドブックの形で公表されている²⁾⁷⁾。これに対して、わが国における試験は、超電導機器の開発のため新しく着手された感が強く、その成果もすべて公に発表されているとはいえない。このように両国間の技術格差はかなり大である。各種の材料試験の中でも、疲労試験のように試験結果を得るのに長時間を要し、しかも試験の実施に多量の液体ヘリウムの供給を必要とするものについては、とくに格段の努力が必要と思われる。このような技術格差を縮めて極低温機器の開発に寄与するためには、各種の試験機を集中的にそろえた極低温材料試験センターを設置して、国産材料に関する標準データを集積することが望ましい。

おわりに、本稿の執筆に当って文献収集などに御助力頂いた神戸製鋼所堀内健文、金属材料技術研究所石川圭介の両氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) C.W. Fowlkes and R.L. Tobler : Engineering Fracture Mechanics 8 (1976) 487
- 2) *Handbook on Materials for Superconducting Machinery* : Metals and Ceramics Information Center, Fattelle Columbus Laboratories, (1974)
- 3) R.P. Reed : Advances in Cryogenic Engineering 7 (1962) 448
- 4) 福島, 岡本, 米満, 伏見 : 日本金属学会誌, 35 (1971) 257
- 5) B. Wielke : Cryogenics 16 (1976) 110
- 6) T. Horiuchi, M. Shimada, T. Fukutsuka and S. Tokuda : ICEC 5 (1974)
- 7) *Cryogenic Materials Data Handbook*, Vol. II (Revised 1970) AFML-TDR-64-280, 558
- 8) T.F. Kiefer, R.D. Keys and F.R. Schwartzberg : Advances in Cryogenic Engineering 10 (1965) 56
- 9) S. Jin, W.A. Horwood, J.W. Morris and V.F. Zackay : Advance in Cryogenic Engineering 19 (1974) 373

- 10) S.S. Manson : Proceeding of the International Conference on Mechanical Behavior of Materials (1972)
 - 11) S. Jin, S.K. Hwang, and J.W. Morris : Metallurgical Transactions A, 6A (1975) 1569
 - 12) A.J. Nachtigall : *Properties of Materials for Liquefied Natural Gas Tankage*, ASTM STP 579 (1975) 378
 - 13) D.W. Chamberlain : Advances in Cryogenic Engineering 9 (1964) 131
 - 14) 福島, 後藤, 伊藤, 伏見 : 日本金属学会誌 36 (1972) 605
 - 15) 北田, 工藤 : 低温工学 6 (1971) 64
 - 16) K. Ishikawa and K. Tsuya : Cryogenics 17 (1977) 295
 - 17) 航技研ニュース (1977) No. 214, 9
 - 18) F.R. Schwartzberg, T.F. Kiefer and R.D. Keys : Advances in Cryogenic Engineering 10 (1964) 1
 - 19) N.R. Adsit, P. Dessau and W.E. Witzell : *Fatigue and Fracture Toughness-Cryogenic Behavior*, ASTM STP 556 (1974) 44
-