

フェライト系鋼脆性-延性遷移温度の超音波試験法

野間口道義*

Ultra-Sonic Testing for Brittle-Ductile Transition Temperature of Ferritic Steels

By

Michiyoshi NOMAKUCHI

Abstract

The ultra-sonic testing for the brittle-ductile transition temperature, the USTB test for short, of ferritic steels is proposed in the present paper. And also the application of the USTB test into the nuclear pressure vessel surveillance is discussed.

The USTB test is based upon the experimental results in the present work that the ultra-sonic pressure attenuation coefficient of a ferritic steel has the evident transition property with its temperature due to the nature from which the brittle-ductile fracture transition property of the steel come and for four ferritic steels the upper boundary temperature of the region in which the transition of the attenuation coefficient of a steel takes place is 4 or 5°C higher than the D_{T_E} , i.e. the transition temperature of the fracture absorption energy of the steel by the DWTT test. The USTB test estimates the crack arrest temperature which is defined to be the fracture transition elastic temperature by the upper boundary temperature.

1. 緒 言

鋼製原子炉圧力容器の供用中の脆化を監視することを目的として、Vシャルピー試験片を炉内に挿入し、定期的に取り出して試験することが行われる。また、破壊力学にもとづいた評価を直接利用する¹⁾ことが可能な WOL 試験片を V シャルピー試験とともに、圧力容器内に挿入している原子炉もある²⁾。

現行の ASME Section III の不安定破壊防止に対する安全基準には、Pellini 等 (U.S. NRL) の破壊解析線図法 (FAD Technique) に基づいた、遷移温度による手法が基本的なものの一つとして採用されている。FAD によれば、 $NDT+33^\circ C$ は FTE 温度 (Fracture Transition Elastic Temperature) に対応し、これ以上の温度では潜在的な亀裂または鋭い切欠があっても脆性亀裂伝播は起らないとされ、降伏応力以下の弾性応力状態で脆性亀裂の伝播が停止する温度 (脆性亀裂伝

播停止温度) が FTE にあたる。ここに、NDT 温度は NRL 落重試験で定まる脆性-延性遷移温度であって、無延性遷移温度と呼ばれているものであり、V シャルピー試験の破壊吸収エネルギーが 30 ft-lb となる温度 ($\sqrt{T_{r30}}$) にほぼ対応している。FAD は NRL での多くの実験結果にもとづくものであるが、厚さ 30 cm もあるような ASTM A533B 鋼の場合、FTE が $NDT+39^\circ C$ となるという報告もある³⁾。また FTE 以上の温度でも圧力容器に亀裂や鋭い切欠などの欠陥が存在し、かつ材料の V シャルピー試験による上部棚吸収エネルギーが低下していれば、延性領域であっても、低エネルギーの亀裂伝播が起り得るという考察から、ASME Sec. III では $NDT+33^\circ C$ において V シャルピー試験の吸収エネルギーが 50 ft-lb 以上で、かつ横膨出量が 35 mils 以上であることを使用材料に対して要求している。このような条件を満たす NDT を Sec. III では RT_{NDT} (Reference Nil Ductility Temperature, 関連適合温度) と定義しており、原子炉用低合金鋼について、その使用温度 T に対して、(T -

* 原子力船部

原稿受付: 昭和53年8月8日

RT_{NDT})の温度における参照破壊靱性値 K_{IR} を与え、不安定破壊防止に対する評価基準としている。NDT, FTE, RT_{NDT} の種々の遷移温度あるいは 50 ft-lb, 35 mils, 上部棚エネルギーなどの靱性値は使用材料の破壊靱性特性を表わすものであるが、原子炉の供用中監視試験では V シャルピー試験などにより、压力容器の脆化の程度を、遷移温度の上昇量や吸収エネルギーの低下量として把握する必要がある。しかしながら原子炉压力容器の監視試験を V シャルピー試験で行なうには、多数の試験片を必要とし、压力容器の脆化の程度を正確に把握するのに困難を伴うため、供用中の压力容器の安全性を評価する上で種々問題がある。

そこで、フェライト系鋼の脆性-延性遷移温度の試験法として、試験片が小型で、かつ少数ですむ、あるいは供用中の原子炉压力容器の胴部に直接適用が可能な試験法の開発について研究を行った。

その結果、フェライト系鋼の超音波音圧減衰係数の温度依存特性を利用する非破壊的な材料試験法によって、鋼材の脆性亀裂伝播停止温度を推定できることがわかった。この試験法は鋼材の脆性-延性遷移特性を試験する応力波法の一つといえる。応力波法の別の方法としては、火薬の爆発による応力波を用いる試験法⁴⁾が研究されている。また、フェライト系鋼の超音波音圧減衰係数の温度依存特性を材料試験に利用することをねらった研究には楳木らの研究⁵⁾がある。本研究が楳木らの研究と異なる点の一つは、本研究によって開発した試験法がフェライト系鋼の脆性亀裂伝播停止温度を推定する点である。

2. 超音波脆性試験法

2.1 超音波脆性試験法の定義

研究において実験に供した ASTM A302B, A212B, および A542 の各鋼の場合、衝撃試験の破壊吸収エネルギーと同様に、音圧減衰係数がそれぞれ鋼材ごとに異なる温度領域において顕著な遷移を示し、かつこれらの遷移温度の上限はどの供試材についても、DWTT 試験のエネルギー-遷移温度の高温側で、近くにあることが観測された。このように鋼の破壊におけるエネルギー吸収と音圧減衰におけるエネルギー吸収の温度依存に同様の特性が観測されることは、両者の温度依存特性が鋼のある同じ性質に起因するものであることを示している。

この材料試験法においては、試験片または被試験箇所の温度を変化させながら、一定周波数の超音波をそ

れらに入射して伝播させ、音圧減衰係数を測定する。測定された音圧減衰係数の温度依存特性には、減衰の小さい温度領域と減衰の大きい温度領域との遷移がみられる。鋼材の超音波音圧減衰係数の大きい温度領域では、鋼材の応力波エネルギーの吸収能が大きいのである。したがって、この材料試験法は超音波音圧減衰係数の遷移温度領域の上限をもって、試験片または被試験箇所の脆性亀裂伝播停止温度を推定するものである。なお、遷移温度領域の上限は、上限附近で、最大曲率を与える温度とする。

以後、この材料試験法を超音波脆性試験法 (USTB 試験法) と呼び、この試験法によって推定される脆性亀裂伝播停止温度を sT_a と記す。

2.2 超音波脆性試験の方法

2.2.1 電気音響変換素子

超音波脆性試験において、応力波である超音波と電気振動を相互に変換するための電気音響変換素子としては、水晶やロッシェル塩などの圧電振動子、またはニオブ酸鉛系やジルコンチタン酸鉛系磁器などの電歪振動子が考えられる。これらの振動子の内で、最も安定した試験周波数が得られる振動子は水晶圧電振動子であるので、超音波脆性試験には水晶圧電振動子が適している。試験温度範囲は約 100°C であるから、固有振動数の温度係数が $-10^{-4} \sim 10^{-4}$, (1/°C) の水晶圧電振動子を用いれば、試験温度範囲にわたって、周波数の変化が 1% より小さい試験周波数が得られる。

一方、水晶圧電振動子は、圧電率が他のそれに比して小さいという欠点を持っている。しかし、入力電気振動パルスのエネルギーを高くするか、あるいは後述の接触媒質として密度の適当なものをを用いることによって、この欠点は解決される。圧電率の温度による変化に対しては、数個の反射波が観測できるような装置、例えば、市販されている高性能の超音波探傷器、を使用すれば、圧電率の温度による変化は消去できる。なお、水晶圧電振動子は、およそ 500°C より高温では、圧電率がほぼゼロとなり⁶⁾、使用にたえない。

2.2.2 接触媒質

鋼材と気体との界面で音波は、ほとんどすべて反射してしまう。そこで振動子と被試験体との間の空間をうめ、被試験体と振動子との間の応力波エネルギーの伝達を増加させるために接触媒質を用いる。

接触媒質としては、水や油などの液体で試験温度の範囲内でボイドを生じないようなものをを用いる。これは振動子と被試験体との間の空間をうめるには液体が

適しているからである。入力する電気振動パルスのエネルギーの高さ、振動子の特性、被試験体の音響インピーダンス、および試験温度範囲などによって適当な液体を接触媒質として選ばばよい。

2.2.3 1 振動子法と 2 振動子法

超音波脆性試験の方法には、1 個の振動子で送波と受波をかねる方法（1 振動子法）および送波用と受波用の 2 個の振動子を用いる方法（2 振動子法）がある。図-1 は、2 振動子法の例であって、超音波脆性試験法を小型の試験片に適用する場合の概念図である。ここでは、試験温度制御用の液体が振動子と被試験体の

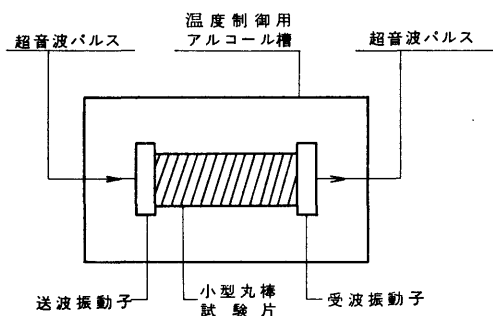


図-2 振動子法による小型試験片の USTB 試験の概念図

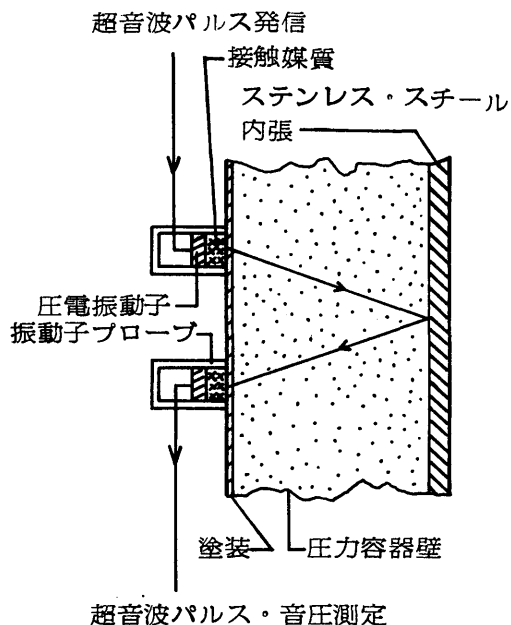


図-2 2 振動子法による压力容器壁の USTB 試験の概念図

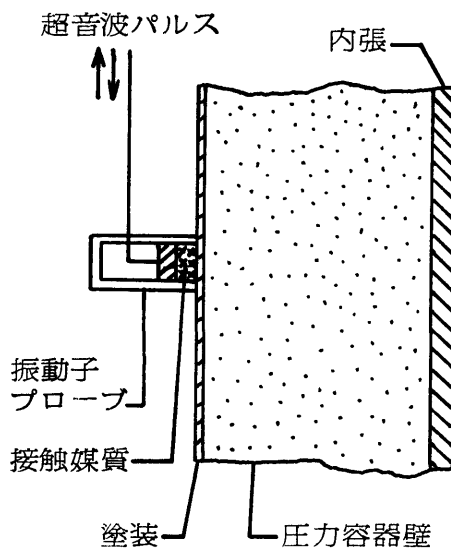


図-3 1 振動子法による压力容器壁の USTB 試験の概念図

間の空間をうめ、接触媒質の役目をはたしている。図-2 はまた 2 振動子法の例であり、図-3 は 1 振動子法の例であるが、いずれも試験片を用いなくて鋼製原子炉压力容器に適用する場合の概念図である。

2.3 原子炉压力容器の監視試験への応用

軽水型原子炉の定期検査における加圧試験は、脆性破壊を防止し得ることを考慮して、試験温度を設定する必要がある。この場合、脆性亀裂伝播停止温度 $RT_{NDT} + 33^\circ\text{C}$ が一つの目安となる。一方この限界温度以下では、最も厳しい条件での脆性破壊が生じる限界応力は 5 kg/mm^2 とされ⁷⁾、限界温度以下ではこの限界応力を超えないように加圧試験の試験条件を選らばなければならない。

飽和水蒸気圧による压力容器の応力が 5 kg/mm^2 の限界応力となる冷却水の温度はほぼ 210°C に対応し、压力容器の中性子照射脆化によって、先に述べた限界温度が 210°C 程度となると、その原子炉は寿命がきたとされる。また定期検査および燃料交換の前には、炉は停止され、压力容器の温度はおよそ 40°C まで冷却される。そこで、压力容器に直接超音波脆性試験法を適用する場合、この試験法はこれらの温度範囲、すなわちおよそ 40°C から 250°C までの温度で試験が可能でなければならない。

水晶圧電振動子の使用温度上限は 500°C であるので、現在、市販されている超音波探傷器で、固有振動

数の温度係数が $-10^{-4} \sim 10^{-4}$, ($1/^\circ\text{C}$) の水晶圧電振動子を使用すれば, 250°C までの試験は可能であろう。

さて, 試験片なしで直接, 鋼製原子炉压力容器に適用する場合, 压力容器の温度を試験のためにだけ, およそ 40°C から 250°C で変化させることは困難なことである。しかし, 定期検査, 燃料交換, あるいは起動時における压力容器の温度変化を利用すれば, 超音波脆性試験を压力容器自体に適用することは不可能ではないと考える。

原子炉压力容器鋼は中性子照射によって, 脆性-延性破壊遷移温度が上昇するばかりでなく, 上部棚破壊吸収エネルギーが低下することはよく知られている。このように上部棚破壊吸収エネルギーの低下した鋼材は延性領域においても亀裂伝播を阻止する能力が低下しており, 低エネルギー破壊を起しやすい。米国では照射効果による上部棚破壊吸収エネルギーの低下を V シャルピー試験によって詳細に規制している。したがって, 超音波脆性試験法は, それを原子炉压力容器の監視試験に応用する場合には, 上部棚破壊吸収エネルギーを測定できるものでなければならない。さて, 非照射および照射済みの鋼材の V シャルピー試験のデータ⁸⁾からエネルギー-遷移温度 vT_{RE} と上部棚破壊吸収エネルギーとの間には, 図-4 に示すような簡単な関係があることが判る。したがって, 超音波脆性試験による sT_a から, 例えば $vT_{RE} = sT_a - 33$, ($^\circ\text{C}$) として, 安全側で, vT_{RE} を推定できるとすれば, その sT_a

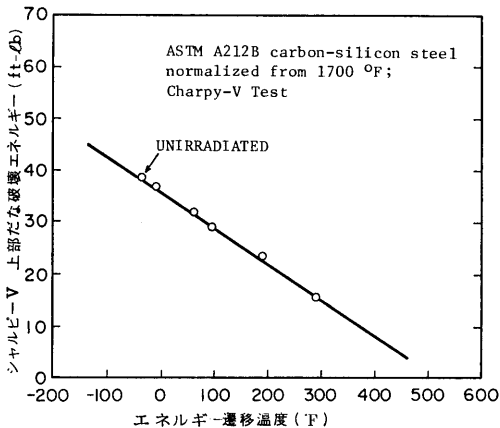


図-4 Charpy V-Notch Test の上部棚破壊吸収エネルギーとエネルギー-遷移温度 vT_{RE} との関係。この図面は, R. G. Berggren の照射実験による破壊吸収エネルギー-温度依存曲線から上記の両者を著者が読みとり作図したものである。

から V シャルピー試験の上部棚破壊吸収エネルギーが推定できることになるだろう。

最後に, 压力容器の監視試験の結果は, 通常の炉起動時に, 压力容器内圧上昇および温度上昇の制御のために使用されねばならない。そこで, 若しこの超音波脆性試験法を試験片なしで原子炉压力容器の監視試験へ応用することが可能となれば, この試験法は压力容器の炉起動時の運転温度を試験温度にとることが出来るため, 上記の制御に試験結果を使用することが容易になる。

3. 実験

3.1 実験 1

フェライト系鋼の脆性-延性遷移特性の試験法として, 試験片が小型かつ少数で済む, あるいは試験片を用いない試験法の開発のために, まず非照射鋼材の小型丸棒試験片について試験片の温度を変化させながら超音波音圧減衰係数を測定する実験を行った。

実験 1 では, 写真-1 の超音波音圧減衰測定装置を用いる。この装置は 図-5 に示す超音波音圧減衰測定系をなしていて, 超音波パルス発信部からの電気振動

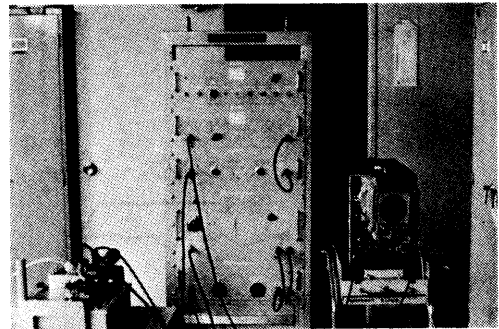


写真-1 実験に使用する超音波音圧減衰測定装置

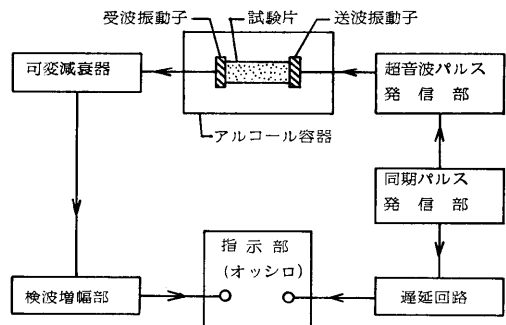


図-5 超音波音圧減衰測定系

によって送波用の振動子を強制振動させる，すなわち振動子の温度変化に伴ってその固有振動数が大きく変化しても，ほぼ一定の周波数の電気振動によって振動子を振動させる。また，この装置では，試験周波数の設定をそれぞれの周波数用のコイルおよび振動子プローブをこの装置に結線することによって行う。周波数およそ 2 MHz の超音波によって実験 1 を行う。振動子プローブとしては，上記の装置で 2 MHz 用のものであって，水晶圧電振動子が -40°C から 100°C でアルコールまたは水に対して液密になるようプローブに埋め込まれたもの（振動子プローブ No. 1）を使用する。試験片としては，藤井らの研究⁹⁾において ASTM A302B 鋼の原厚 100 mm の素材から切り出された DWTT 試験片 ($B=25\text{ mm}$) から丸棒試験片 ($15\text{ mm}\phi$) を採取する。その際，丸棒試験片の軸方向をロール方向に合せる。試験片の温度制御にはアルコール槽を用いる。また同じアルコールが接触媒質の役目を果たしている。図-6 は測定用セルに振動子プローブ No. 1 および丸棒試験片を装置したときの，それらの配置を示す。実験データはブラウン管波形を接写装置によって写真撮影して記録する。

一般に，受波振動子（例えば 図-1 参照）を通してブラウン管で観測される音圧 P , (V) は，被試験体の音圧減衰係数を α , (cm^{-1})，また超音波の行程を t , (cm) とすれば，次の (1) 式で表わされる。

$$P = ARe^{-\alpha t}, \quad (1)$$

ここに， A , (V) は送波振動子へ入力する電気振動および水晶圧電振動子の圧電率に依存する因子，また R はそれぞれの系における音波の反射干渉効果に依存する因子である。

実験 1 においては，入力電気振動，圧電率，および

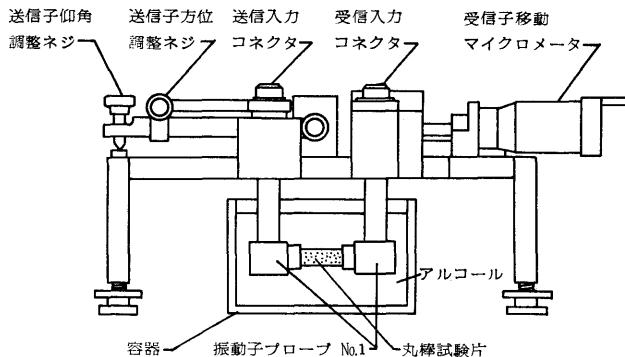


図-6 測定用セル，振動子プローブ No. 1，および小型丸棒試験片の配置

反射干渉効果に依存する因子たち，すなわち A および R を消去して，鋼材の超音波音圧減衰係数そのものを測定し，その温度依存特性を調べる実験を行う。入力電気振動，圧電率，および反射干渉効果の影響を消去するために，以下に述べることを行う。15 $\phi \times 20\text{ mm}$ および 15 $\phi \times 50\text{ mm}$ の 2 本一組の丸棒試験片を作り，切口を同じように研磨しておき，それぞれ別途に，同じ装置で，図-1 に示す方式で，試験片の温度を変えながら，透過波の音圧を測定する。その際，音圧の測定は干渉効果のはいらない第 1 番目の透過波の波高によって行う（図-7）。短い方の試験片の長さ 20

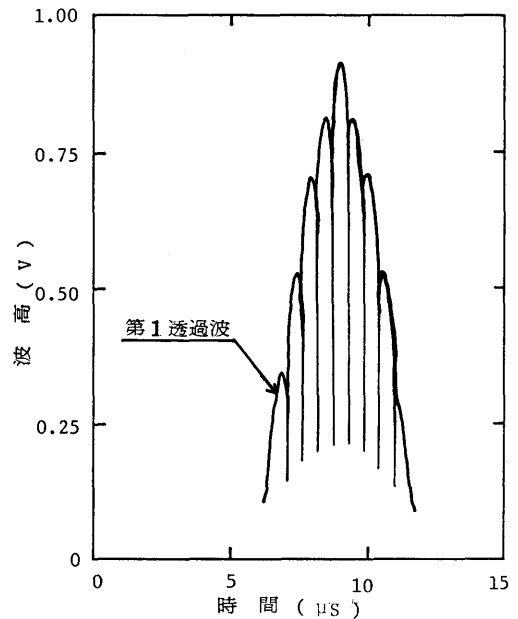


図-7 第 1 透過波

mm は，周波数 2 MHz の超音波の鋼材中での波長，約 3 mm より充分に長い。また，超音波音圧減衰測定装置の入力を交流定電圧装置から取ることによって，水晶振動子の温度が同じならば，その振動子へ入力する電気振動パルスが，したがってその振動子の出力する応力波パルスが同じであるようにしている。最後に，試験片の線膨張に伴う試験片切口と振動子の配置の変化は，図-6 に示す測定用セルのマイクロメータおよび送信子仰角調整ネジによってさげられる。

ある試験温度において，長さ t_2 , (cm) の丸棒試験片の場合に測定される音圧を P_1 ,

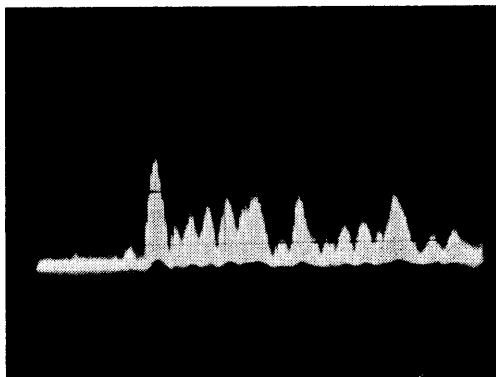


写真-2 -16°C ; ASTM A302B 鋼の小型丸棒試験片 $15\text{ mm}\phi \times 20\text{ mm}$ の透過波，縦軸は電圧 (0.5 V/div)，横軸は時間 ($10\ \mu\text{s/div}$)

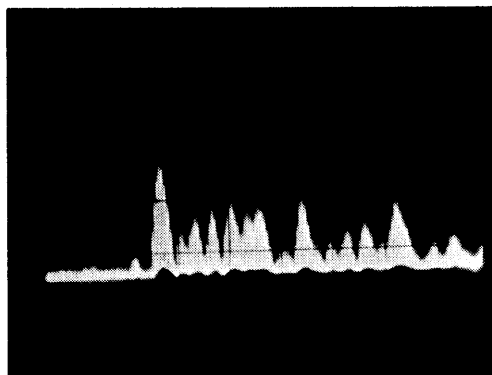


写真-3 -13°C ; 同前

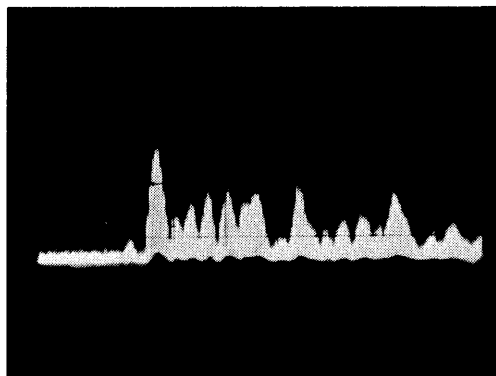


写真-4 -4.5°C ; 同前

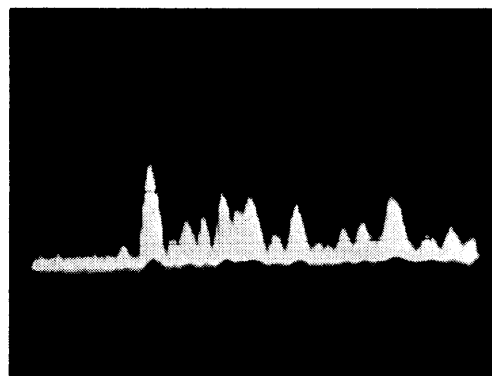


写真-5 2°C ; 同前

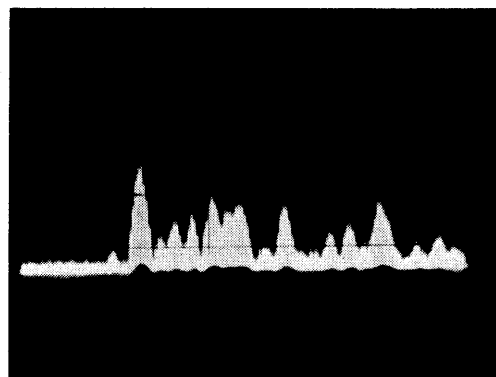


写真-6 9°C ; 同前

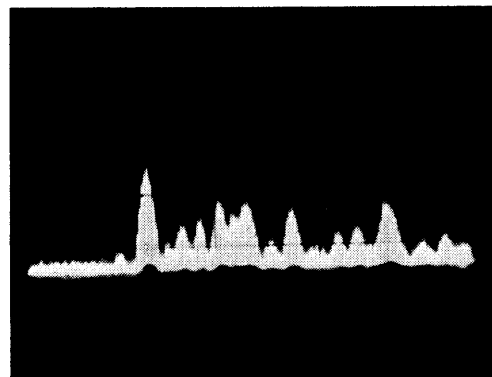


写真-7 13°C ; 同前

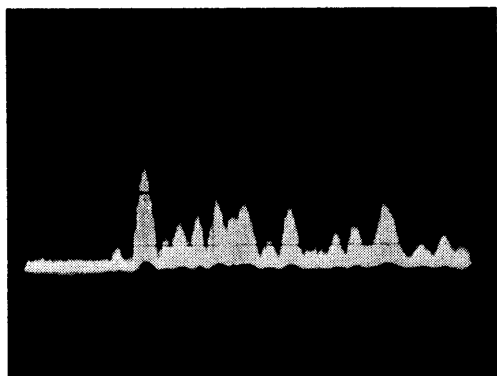


写真-8 18°C; 同前

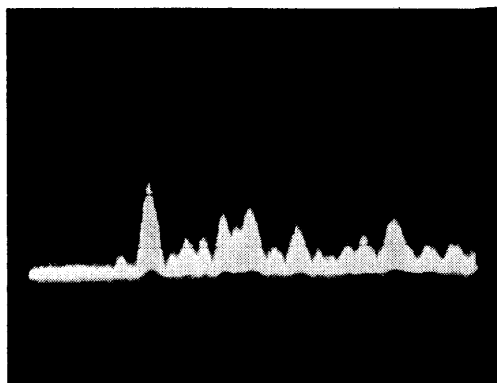


写真-9 26.5°C; 同前

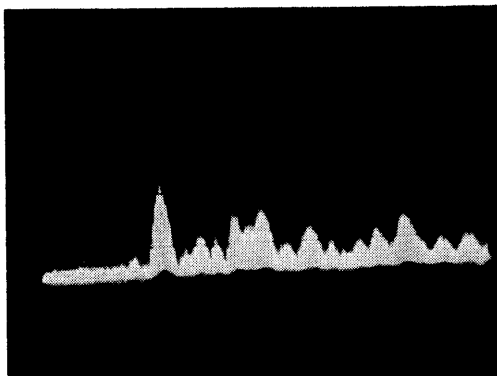


写真-10 34°C; 同前

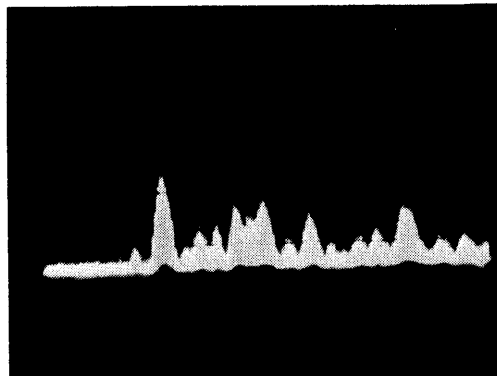


写真-11 41°C; 同前

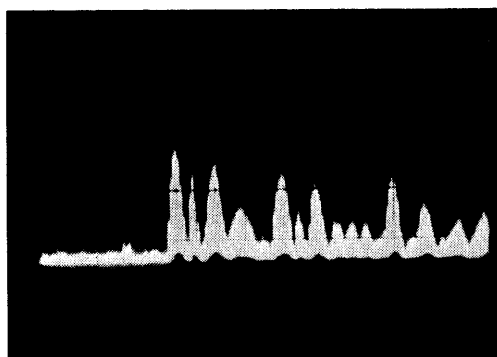


写真-12 -20°C; ASTM A302B 鋼の小型丸棒
試験片 15 mmφ×50 mm の透過波, 縦
軸は電圧 (0.5 V/div), 横軸は時間 (10
μs/div)

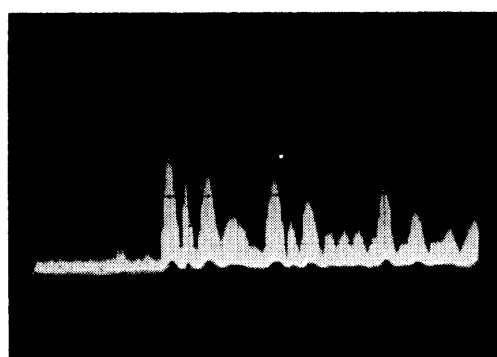


写真-13 -16°C; 同前

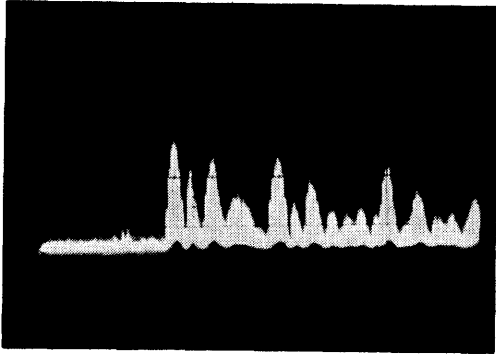


写真-14 -9°C ; 同前

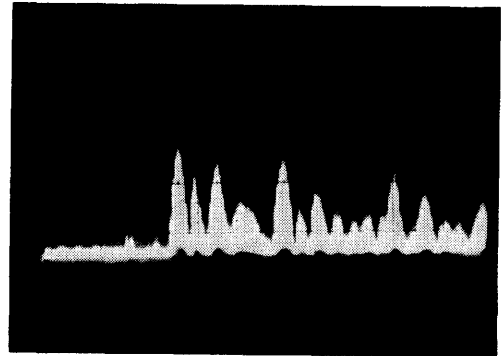


写真-15 -4°C ; 同前

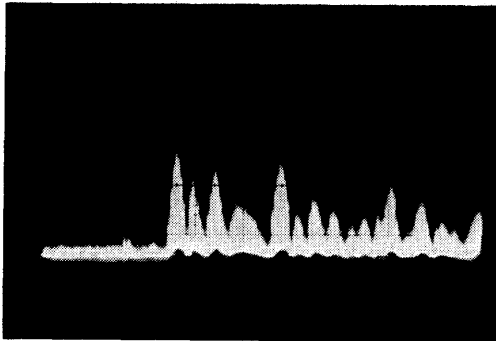


写真-16 2°C ; 同前

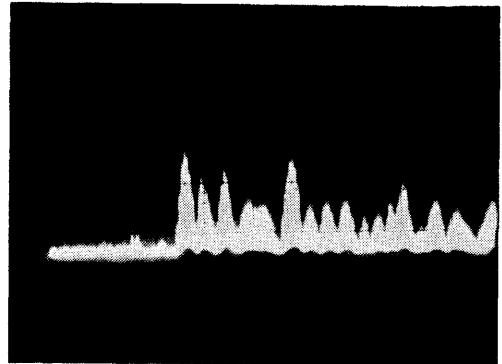


写真-17 13°C ; 同前

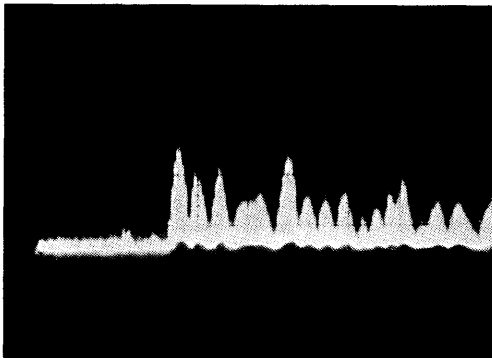


写真-18 19°C ; 同前

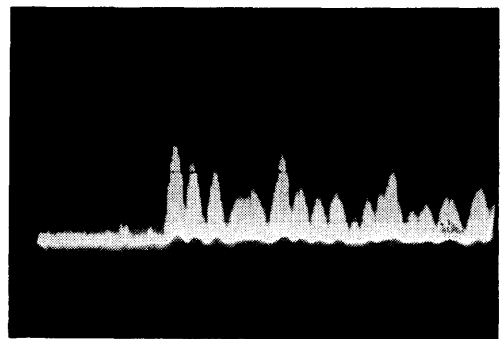


写真-19 25°C ; 同前

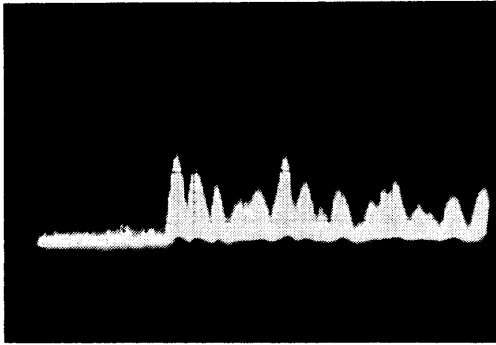


写真-20 37°C; 同前

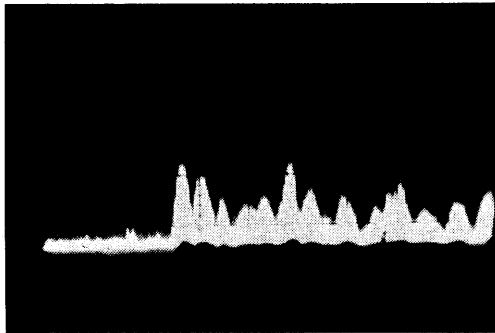


写真-21 40°C; 同前

長さ t_2 (cm) の場合に P_2 , $t_2 > t_1$ とすれば, (1) 式の A および R は消去されて, その試験温度における丸棒試験片での鋼の超音波音圧減衰係数 α , (cm^{-1}) は次の (2) 式で与えられる。

$$\alpha = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2)$$

したがって, ある試験温度における音圧 P_1 および P_2 を測定すれば, 鋼の超音波音圧減衰係数が測定される。

試験温度の測定は, 試験片と形状および材質が同じで, 中心部にシーテ熱電対の先端をうめ込んだ別の試料を丸棒試験片のそばに置き, その模擬試験片の温度を測定することによって行う。

上記の方法によって, ASTM A302B 鋼の丸棒試験片の場合に観測されるブラウン管波形の記録の一部を写真-2 から写真-21 に示す。これらの記録から図-7 に示すような第一番目の透過波の波高を試験温度に対して書いたものが図-8 である。このようにして, (2) 式における P_1 および P_2 が測定され, 今の場合, $t_2 - t_1 = 3$, (cm) であり, 試験に供した ASTM A302B 鋼の丸棒試験片の, 周波数 2 MHz の超音波での音圧減

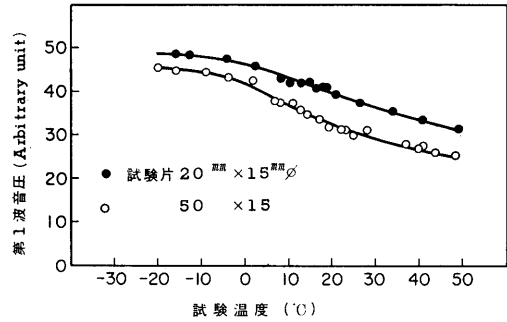


図-8 第1透過波の音圧と試験温度

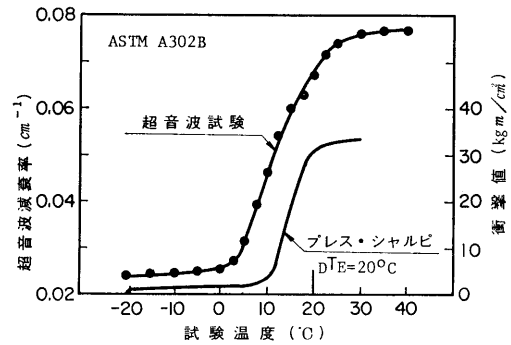


図-9 小型丸棒試験片 (ASTM A302B 鋼) の超音波 (周波数 2 MHz) での音圧減衰係数と試験温度

衰係数が測定される。これらの音圧減衰係数を試験温度に対して書いたものが図-9 である。また図-9 には, 他の衝撃試験法による結果と比較するために, 同じ A302B 鋼について行われたプレス・シャルピー試験の破壊吸エネルギーの温度依存曲線¹⁰⁾および DWTT 試験のエネルギー遷移温度 t_E ⁹⁾ が示されている。

また, 実験 1 の写真撮影による記録を引き伸ばした写真たちによると, 試験温度が -40°C から 40°C まで変化しても, ブラウン管の時間軸の単位は $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ と一定であり, 超音波パルス内に見える波の 5 波長がブラウン管ではほぼ 0.27 cm である。したがって, 試験温度が -40°C から 40°C まで変化しても試験周波数はおよそ 2 MHz で殆ど変化していないことが確かめられる。

3.2 実験 2

水晶圧電振動子の圧電率は, 60°C に最高値を持ち, 室温から 60°C では温度係数およそ 5×10^{-3} , ($1/^\circ\text{C}$) で上昇する。さらに温度を上昇させて行くと, 60°C

からおよそ 300°C では、ほぼ一様であることが知られている⁹⁾。また、(1) 式の A は、反射回数に関しては一定であることから、数個の反射波を観測できる装置を用いれば、試験温度の圧電率に及ぼす影響は、すなわち (1) 式の A は消去できる。

被試験体の厚さを被試験体内でのパルス幅より大きくとれば、接触媒質と被試験体との界面における音波の反射率 β は、波動の干渉効果を考慮しなくてよく、次の (3) 式によって与えられる。

$$\beta = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \cong 1 - 2 \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2}, \quad (3)$$

ここに、 ρ は媒質の密度、 C は媒質の音速である。下付文字 1 は接触媒質、同じく 2 は被試験体、今の場合には鋼材を示す。これより判るとおり、(1) 式の R の温度依存性は接触媒質と鋼の密度および音速の温度依存であって、ほぼ直線性を示すはずである。

一方、(1) 式を AR について書きかえると、次の (4) 式を得る。

$$AR = Pe^{\alpha t}. \quad (4)$$

実験 1 によって、音圧 P 、音圧減衰係数 α 、および超音波の行程 t は測定されている。したがって、実験 1 の系における AR 、すなわち水晶圧電振動子の圧電率および超音波の反射率の影響が温度によってどのように変化するか知ることが出来る。図-10 は実験 1 における AR と試験温度との関係である。図-10 から判るとおり、 AR の温度依存性は、-20°C から 40°C においては、ほぼ直線的である。したがって上述のこ

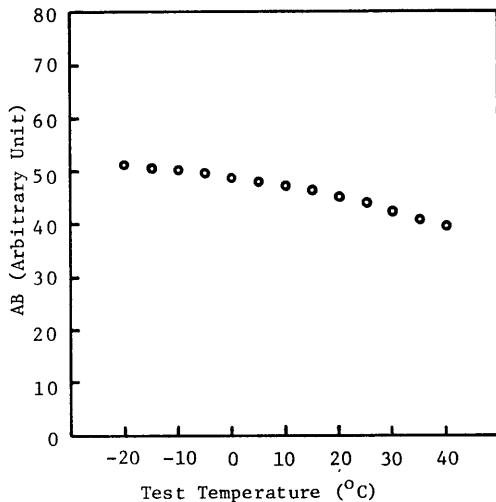


図-10 実験 1 の系における超音波反射率と水晶圧電振動子の圧電率の積の温度依存

とから、 AR の温度依存性は、-20°C から 60°C における鋼の超音波音圧減衰係数の遷移温度領域の測定には無視してよい。

以上の事に基づいて、ASTM A212B, A533B, および A542 鋼について、図-2 に示す方式で実験 2 を行う。実験 2 では、実験 1 と同じ超音波音圧減衰測定装置および交流定電圧装置を使用する。振動子プローブとしては、上記測定装置において周波数 2 MHz 用のものであって、水晶圧電振動子が -40°C から 100°C でアルコールまたは水に対して液密になるよう詰め込まれたもの、すなわち振動子プローブ No. 2

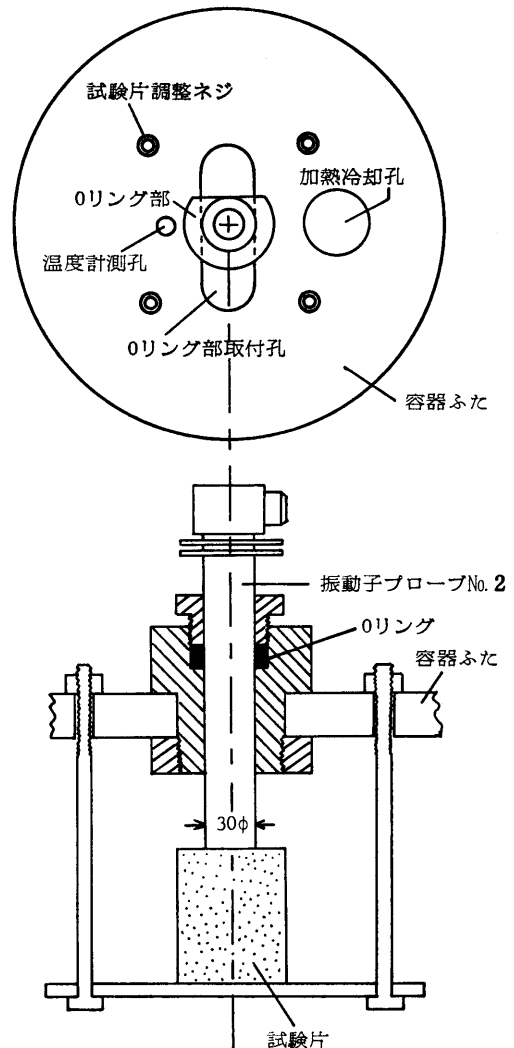


図-11 振動子プローブ No. 2, 試験片, および固定台のセット

(図-11)を使用する。試験片としては、A212B および A533B 鋼については、藤井らの研究^{11),12)}において、それぞれ原厚 100 mm, 200 mm の素材から切り出された WOL-CT 試験片 ($B=50$ mm) を、A542 鋼については、藤井らの研究⁹⁾において、原厚 80 mm の素材から採取された DWTT 試験片 ($B=25$ mm)



写真-22 WOL-CT 試験片 ($B=50$ mm) と振動子プローブ No. 2 の配置

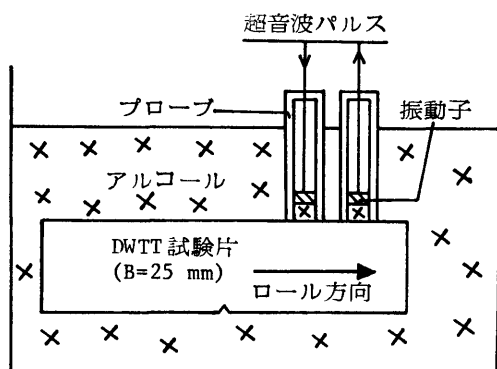


図-12 振動子プローブ No. 2 と DWTT 試験片 (ASTM A542 鋼) の配置

を利用する。振動子プローブと試験片との配置は、A212B および A533B 鋼の実験では写真-22 に、A542 鋼の実験では図-12 に示してある。また、図-11 には振動子プローブと試験片とを固定するための台も示してある。試験温度の制御は液浸法による。その温度制御用の液体は、A212B の実験では水、A533B および A542 鋼ではアルコールを用いる。これらの液体は、同時に、それぞれの実験において、振動子と被試験体との間の空間をうめる接触媒質である。以上の実験条件を、実験 1 の条件も含めて、表にしたものが表-1 である。音圧の測定は受波振動子によって観測される波形の最高波高によって行う。観測される波形の記録は実験 1 の場合と同じ手段による。

このようにして、測定された音圧を試験温度に対して書いたものを、A212B, A533B, および A542 鋼について、それぞれ図-13, 図-14, および図-15 に示す。

ある供試鋼についての実験で、音圧の最高値 P_0 を

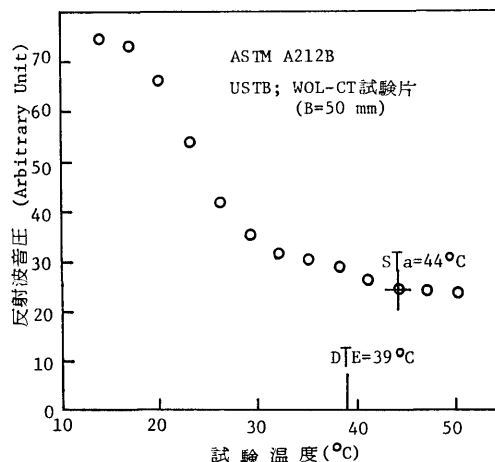


図-13 ASTM A212B 鋼; 反射波音圧と試験温度

表-1 実験条件 (実験 1 および実験 2)

| 供試材 | 試験片 | 振動子および試験周波数 | 試験片と振動子の配置 | 温度制御 | 接触媒質 |
|------------|---|-------------|------------|---------|-------|
| ASTM A302B | 小型丸棒試験片 15 ϕ \times 20 & 15 ϕ \times 50 mm | 水晶 2 MHz | 図-6 | アルコール液浸 | アルコール |
| ASTM A212B | WOL-CT 試験片 $B=50$ mm | 水晶 2 MHz | 写真-22 | 水液浸 | 水 |
| ASTM A533B | WOL-CT 試験片 $B=50$ mm | 水晶 2 MHz | 写真-22 | アルコール液浸 | アルコール |
| ASTM A542 | DWTT 試験片 $B=25$ mm | 水晶 2 MHz | 図-12 | アルコール液浸 | アルコール |

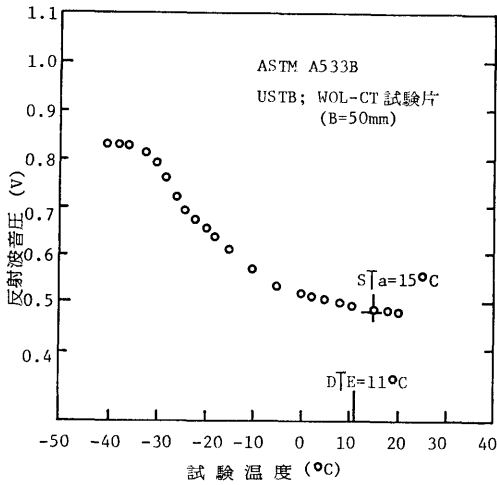


図-14 ASTM A533B 鋼; 反射波音圧と試験温度

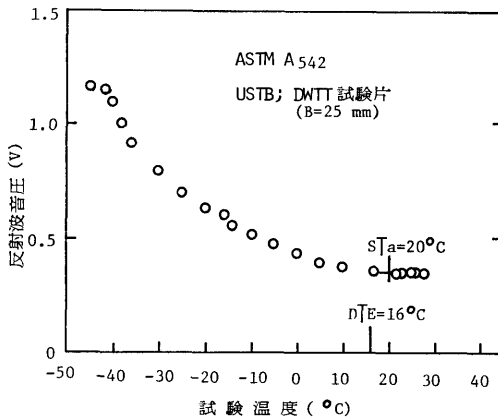


図-15 ASTM A542 鋼; 反射波音圧と試験温度

与える試験温度での、その鋼材の超音波音圧減衰係数を α_0 (cm^{-1}) とし、最高波高を示す超音波の行程を t (cm)、(1) 式の AR を A_0R_0 とすれば、次の (5) 式が得られる。

$$\ln\left(\frac{P_0}{P}\right) = (\alpha - \alpha_0)t + \ln\left(\frac{A_0R_0}{AR}\right). \quad (5)$$

図-16、図-17、および図-18 は、それぞれ図-13、図-14、および図-15 の音圧測定値から求めた $\ln(P_0/P)$ を試験温度に対して書いた図である。(5) 式の αt はほぼ一定であり、 $\ln(A_0R_0/AR)$ の温度による変化は、先に述べたことから、ほぼ直線的である。したがって、図-16、図-17、および図-18 から測定される遷移温度領域は超音波音圧減衰係数の遷移温度領域であ

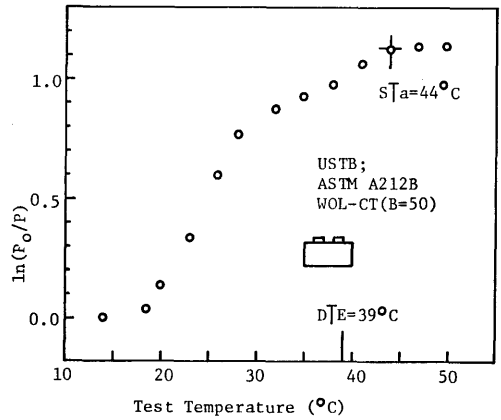


図-16 ASTM A212B 鋼; 超音波 (周波数 2 MHz) の音圧減衰係数の温度依存曲線, $D T_E$, および $S T_a$

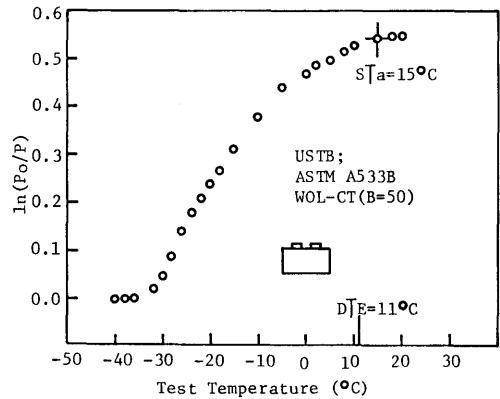


図-17 ASTM A533B 鋼; 図-16 に同じ

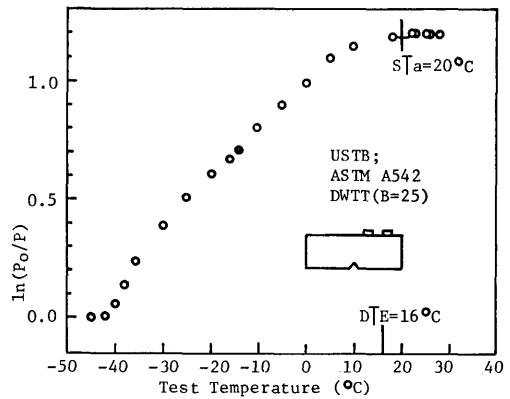


図-18 ASTM A542 鋼; 図-16 に同じ

る。また、それぞれに、この超音波脆性試験による脆性亀裂伝播停止温度 sT_a および同じ鋼材についての DWTT 試験のエネルギー遷移温度 dT_E が書き込んである。これらの dT_E の値は図-9の場合と同じく参考文献 9) によるものである。

3.3 実験結果についての考察

実験 1 および実験 2 によって得られた USTB 試験の脆性亀裂伝播停止温度 sT_a の値と DWTT 試験のエネルギー遷移温度 dT_E の値との比較を表-2 に示す。また、表-2 には、超音波音圧減衰係数と DWTT 試験の破壊吸収エネルギーとの遷移温度領域が比較してある。図-19, 図-20, 図-21, および図-22 は USTB 試験の超音波音圧減衰係数と DWTT 試験の破壊吸収エネルギーとの温度依存曲線の比較であって、それぞれ、ASTM A302B, A212B, A533B, および A542 鋼に関するものである。また、図-19 には、A302B 鋼のプレス・シャルピー試験の破壊吸収エネルギーの温度依存曲線も示されている。図-19 から図-22 の DWTT 試験の温度依存曲線は参考文献 9) によるものであり、図-19 のプレス・シャルピー試験の曲線は図-9 のそれと同じものである。

実験 1 に供した ASTM A302B 鋼について、USTB 試験の超音波音圧減衰係数とプレス・シャルピー試験の破壊吸収エネルギーとの温度依存特性を比較すると、USTB 試験での急激な遷移領域はプレス・シャルピー試験でのそれとほぼ一致しているが、遷移温度領域全体は低温側および高温側ともに、USTB 試験の方が広がっている。

実験 1 および実験 2 に供した 4 種の鋼材について、USTB 試験の超音波音圧減衰係数と DWTT 試験の破壊吸収エネルギーとの温度依存特性を比較すると、供試材 4 種のいずれについても、表-2 に示すように DWTT 試験での遷移温度領域は USTB 試験でのそれより、高温側が、さらに 10°C 程度広がっている。しかし実験に供した 4 種の鋼材では、表-2 から USTB 試験での遷移温度領域の上限の温度 sT_a と DWTT 試験のエネルギー遷移温度 dT_E との間には、次の (6) 式の相関があることが判る。

$$dT_E = sT_a - 4, \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

表-2 DWTT 試験と USTB 試験との試験結果の比較

| 供試材 (ASTM) | dT_E of DWTT Test ($^{\circ}\text{C}$) ⁹⁾ | sT_a of USTB Test ($^{\circ}\text{C}$) | Transition Region | |
|------------|--|--|--|----------------------------------|
| | | | DWTT Test ($^{\circ}\text{C}$) ⁹⁾ | USTB Test ($^{\circ}\text{C}$) |
| A302B | 20 | 24 | (0, 30) | (0, 24) |
| A212B | 39 | 44 | (0, 60) | (15, 44) |
| A533B | 11 | 15 | (-30, 30) | (-30, 15) |
| A542 | 16 | 20 | (-40, 30) | (-40, 20) |

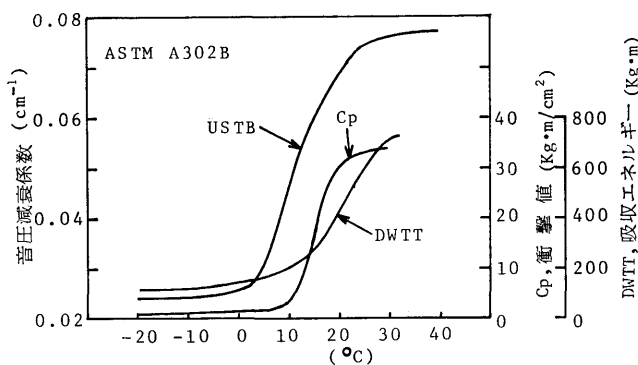


図-19 ASTM A302B 鋼; DWTT 試験およびプレス・シャルピー試験の破壊吸収エネルギーと USTB 試験の超音波音圧減衰係数との温度依存特性の比較

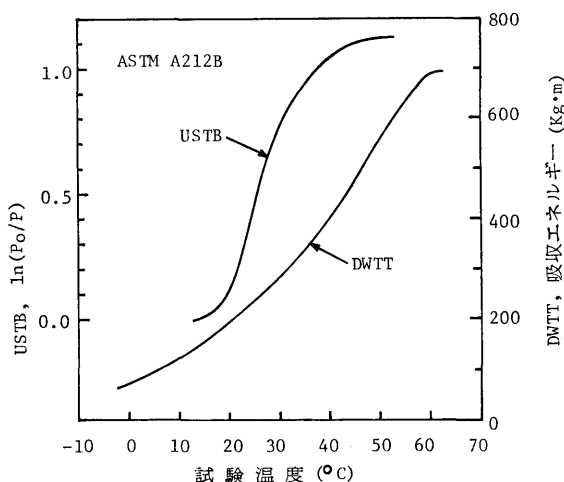


図-20 ASTM A212B 鋼; DWTT 試験の破壊吸収エネルギーと USTB 試験の超音波音圧減衰係数との温度依存特性の比較

4. 結 論

実験 1 および実験 2 に供した 4 種の鋼材のいずれの場合にも、衝撃試験の破壊吸収エネルギーと同様に、

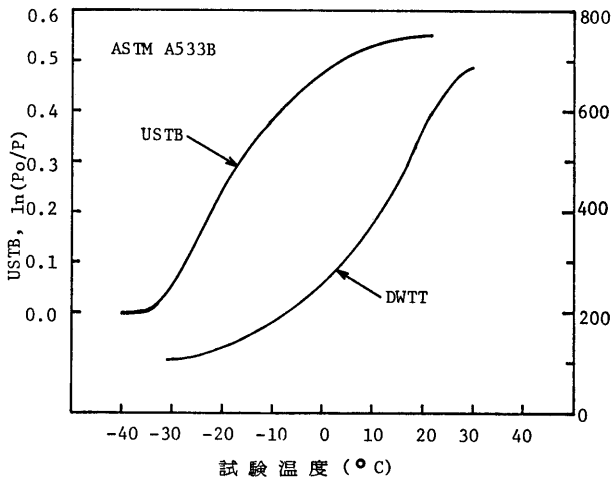


図-21 ASTM A533B 鋼; 図-20 に同じ

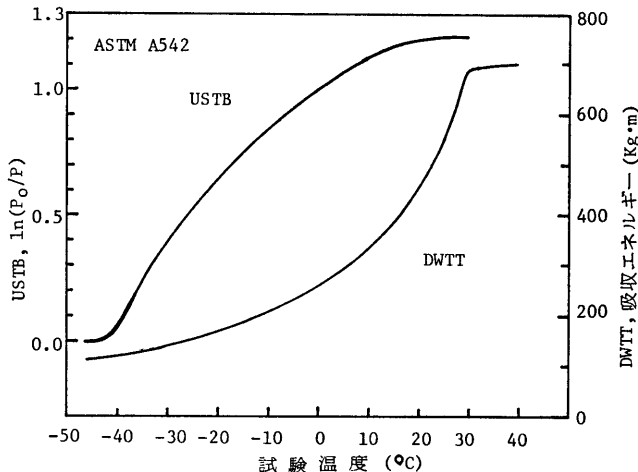


図-22 ASTM A542 鋼; 図-20 に同じ

これらの鋼材の超音波減衰係数が、それぞれ鋼材ごとに異なる温度領域において顕著な遷移を示し、かつ USTB 試験の sT_a と DWTT 試験の dT_E との間に (6) 式の相関があることは、フェライト系鋼の超音波音圧減衰係数の温度依存特性が破壊吸収エネルギーのそれと同一の性質に起因していることを示している。

最後に、DWTT 試験のエネルギー遷移温度 dT_E は脆性亀裂伝播停止温度の良い推定値であることが知られている。また、本研究において、実験に供した ASTM A302B, A212B, A533B, および A542 鋼について、USTB 試験の sT_a は同じ鋼材の dT_E より 4°C から 5°C 高い測定値が得られている。したがって、本研究において行った 4 種の原子炉圧力容器用鋼

についての実験の結果は、USTB 試験の sT_a が脆性亀裂伝播停止温度の推定値として実用に耐え得るものであることを示している。

謝 辞

日本原子力研究所、奥達雄氏には貴重な助言をいただきました。船舶技術研究所、中田正也氏には本研究の出発となる示唆をいただきました。ここに、感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) Mager, T. R., and Tanichko, S. E.: "Use of Fracture Mechanics in Reactor Vessel Surveillance", Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, June 1971, pp. 259-264
- 2) 原子力圧力容器規格調査団 (寺田重三郎団長): 原子力圧力容器規格調査団報告書, 火力発電技術協会, 昭和 42 年 5 月
- 3) Loss, F. J., Hawthorne, J. R., and Serpan, C. Z., Jr.: "A Reassessment of Fracture-Safe Operating Criteria for Reactor Vessel Steel Based on Charpy-V Performance", Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, June 1971, pp. 247-258
- 4) Van Elst, H. C.: "The Development of a New Method to Determine the Brittle-Ductile Transition in Steel", EURAEC 1284, Dec. 1964
- 5) 横木義一, 藤井太一, 明石 一, 寺石 稔: 低温における鋼材内の超音波減衰, 材料試験, 第 6 巻 第 47 号, 昭和 32 年 8 月, pp. 534-537
- 6) Dawson, L. H.: "Piezoelectricity of Crystal Quartz", Physical Review, 29, 4, 1927, pp. 532-541
- 7) Kihara, H., and Masubuchi, K.: "Effect of Residual Stress on Brittle Fracture", Welding Journal, 38, 4, 1959, pp. 159s-168s
- 8) Berggren, R. G.: "Radiation Effects in Ferritic Steels", USAEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Design (Chicago, Oct. 1959), Oct. 1960, pp. 91-197
- 9) 藤井英輔, 大熊 勇, 北村 茂: 原子炉用鋼板の脆性破壊特性 (その 5) (DWTT 試験および WOL-CT 試験結果について), 船舶技術研究所

- 研究発表会講演集, 25, 昭和 50 年 5 月, pp. 39-42
- 10) 小倉信和, 他: 原子炉圧力容器用鋼板の脆性破壊強度特性, 未発表
- 11) 藤井英輔, 大熊 勇, 長谷川尚徳: 原子炉用厚鋼板の脆性破壊発生特性について (その 3), 船舶技術研究所研究発表会講演集, 19, 昭和 47 年 5 月, pp. 24-27
- 12) 藤井英輔, 大熊 勇: 原子炉用厚鋼板の脆性破壊発生特性について (その 4), 船舶技術研究所研究発表会講演集, 21, 昭和 48 年 5 月, pp. 153-156