

JAERI-M

8822

JT-60トロイダル磁場コイルの導体
接続部における機械的強度評価
(臨界プラズマ試験装置設計報告・77)

1980年4月

西尾 敏・大久保 実・笹島 弘*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JT-60 トロイダル磁場コイルの導体接続部
における機械的強度評価
(臨界プラズマ試験装置設計報告・77.)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
西尾 敏・大久保 実・笹島 弘*

(1980年3月17日受理)

本報は、現在建設中の臨界プラズマ試験装置の主要機器の一つであるトロイダル磁場コイルの導体接続技術に関する報告である。

著者らは、導体接続箇所要求される主な条件、すなわち

- 1) 導体には、冷間加工を施しているため、治金的接続時の加熱による軟化域を極力小さくする。
- 2) 導電率等電気的特性の著しい低下を招かないこと。
- 3) 静的荷重および繰り返し荷重に対し破損および破断に至らないこと。
- 4) 高い製作精度を有すること。

等を常に念頭に置き、接続方法および検査方法を確立した。さらに、導体接続部に要求される機械的強度を、静的および疲労の面から満足するように検査の合否判定基準を設定した。

なお、本報においては、上記諸条件のうち最も重要と考えられる 3) の観点に立った検討評価に重きを置いた。

* 日立製作所(株)電気検査課

Evaluation of Mechanical Strength of the Joints in JT-60
Toroidal Field Coil Conductors

Satoshi NISHIO, Minoru OHKUBO and Hiroshi SASAJIMA*

Division of Large Tokamak Development
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received March 17, 1980)

Toroidal field (TF) coils of JT-60 produce a toroidal field of 45 kG at a plasma axis, they have an inner bore of 3.90 m and a weight of about 80 metric tons per coil. Eighteen TF coils are located around a torus axis at regular intervals.

TF coil conductors are mostly jointed by high frequency induction brazing, the rest jointed by welding. In deciding the details of the jointing procedures, the conductor size and the requested mechanical strength are mainly taken into consideration.

Described are non-destructive inspection methods for the brazed joints, strength evaluation, and the inspection criteria. Ultrasonic testing method is found to be the most effective in evaluation of mechanical properties of the brazed joints especially in terms of fatigue strength.

In section 1, specifications of the TF coils are given. In section 2, the ultrasonic inspection method and the detectability of this apparatus are described in detail, the defects of known size are compared with the indication values and display figures. The apparatus³⁾ developed for JT-60 is operated automatically also recording the inspection results. In section 3, mechanical strength of the brazed joints with initial defects is discussed on the basis of Fracture Mechanics theory and results of the fatigue crack growth test. The inspection criteria in accordance with the descriptions of section 2 and 3 are given in section 4.

Keywords: JT-60 Tokamak, Toroidal Field Coil, Conductor Joint, Brazing, Ultrasonic Inspection, Stress Intensity Factor, Fatigue Crack Growth Rate,

* Hitachi Works of Hitachi Ltd.

Contents

1. Introduction	1
2. Inspection system	1
2.1 Inspection method	2
2.2 Detectability	2
3. Evaluation of mechanical strength	3
3.1 Stress.....	3
3.2 Static strength	3
3.3 Fatigue strength.....	4
4. Inspection criteria.....	10
5. Conclusion	10
Acknowledgements	11
References	11
Appendix.....	27

目 次

1. 序論	1
2. 検査システム	1
2.1 検査方法	2
2.2 実際欠陥と表示欠陥の対応	2
3. 強度評価	3
3.1 応力評価	3
3.2 静的強度	3
3.3 疲労強度	4
4. 合否判定基準	10
5. 結論	10
謝辞	11
参考文献	11
Appendix	27

Figure Captions

- Fig. 1 Unit Toroidal Field Coil
- Fig. 2 Cross Section of Toroidal Field Coil
- Fig. 3 Schema of Brazing Method
- Fig. 4 Inspection Condition at Brazed Joint
- Fig. 5 Test Sample with Known Size Defect
- Fig. 6 Dependence of Reflection Intensity on Defect Diameter
- Fig. 7 Stress Distribution of Joints with Thermal Stress
- Fig. 8 Stress Distribution of Joints without Thermal Stress
- Fig. 9 Test Sample for Fatigue Crack Growth
- Fig. 10 Fatigue Crack Growth Rate in the Brazing Part
- Fig. 11 Crack Model for Calculating Stress Intensity Factor
- Fig. 12 Model of Deviated Defect from Centre
- Fig. 13 Membrane Correction Factor for Sub-Surface Flaws
- Fig. 14 Ultrasonic Inspected Result

Table Captions

- Table 1 TF Coil Specification
- Table 2 Maximum Stress at Brazed Joints
- Table 3 Dependence of Tensile Strength on Defect Ratio

Photograph Captions

- Photo. 1 Displayed Sample of Inspected Brazed Joint
- Photo. 2 Microscopic Photograph of Brazed Joint
- Photo. 3 Comparison between C Scope Figure and A Scope Scanning Graph
(at 60dB and 54dB)
- Photo. 4 Ultrasonic Inspected Results of Tensile Test Sample
- Photo. 5 Fracture by Fatigue Crack Growth

1. 序 論

現在、日本原子力研究所ではトカマク型核融合炉の科学的実証性を明らかにするため、1983年完成を目途として、臨界プラズマ試験装置（以下JT-60と略記する¹⁾）の建設に着手している。

JT-60の主要機器の一つであるトロイダル磁場コイルは18個の単位コイルより構成され、トーラス状のプラズマを安定化させるためトロイダル方向に一様な強磁場を発生させる機能を有する。単位コイル巻数36ターンのパンケーキコイル2個より成り、形状は内半径1970mm外半径2780mmの円形常電導コイルである。また、空間的制約から本コイルはトーラス中心側でテーパ状に切欠かれたセクタ形となっている。Fig. 1に単位コイルの全体図を、Fig. 2にコイル導体の断面図を、Table 1にコイル諸元をそれぞれ示す。実機コイルの製作に先立って導体接続に関する試作開発を実施し、治具の開発、作業工程管理法および検査システム等において一応の満足すべき結果を得た。²⁾採用し得る治金的接続法は電氣的機械的性能への影響および作業性等の判断からロウ付および溶接とする。溶接に関する報告は別報に譲り、本報においてはロウ付を対象とする。

文献2)にも述べているが、ロウ付法というのは接続すべき母材金属よりも低融点の金属（ロー材）を溶融し、毛管現象を利用して間隙を充填し、固液相間の漏れ現象により金属結合（例えば固溶体形、共晶形、金属間化合物）を生成させるものである。Fig. 3にロー付法の略図を示す。基本的には試作開発で得た技術を実機製作に適用することになり変わらないが、ロー材の供給方法に改善を施した。すなわち、試作開発においては銅製の発泡金属にロー材を真空含浸させ厚さ約1mmにプレスした「複合ロー材」を用いたが、実機においては厚さ0.6mmの置きロウおよび溶融時のロー材流出による減少分を考慮して $\phi 1.6\text{mm} \sim \phi 2.4\text{mm}$ の挿しロウを行う。試作開発の方式と比較して、実機方式の方が発生ボイドが少なくかつ作業性を優れている。

以下2章に探傷機器の性能を含めて検査システムについて述べ、3章にて強度評価を行い、4章にて探傷機器の性能および強度評価の結果等を充分踏まれて設定した合否判定基準を述べる。さらに、現在既に完了している1000箇所以上のロウ付部の検査結果を述べ本ロウ付部が充分高い信頼性を有する事を明らかにし5章の結論とする。

2. 検査システム

設計からロウ付箇所に要求される性能を発揮し得ることを確認するために検査システムの確立は必須である。採用すべき検査方法は非破壊検査の中より選択されねばならず、破壊力学的手法を設計技術に取り入れるためには非破壊検査による欠陥の定量的情報を高い精度で知ることが不可欠である。JT-60トロイダル磁場コイルのロウ付箇所は2000箇所にも及ぶため作業能率の観点から応答速度が速く自動化の容易な超音波探傷法を採用した。従来から超音波探傷法の欠点として、記録性に乏しい等が指摘されている。本検査のために新たに自動超音波探傷

1. 序 論

現在、日本原子力研究所ではトカマク型核融合炉の科学的実証性を明らかにするため、1983年完成を目途として、臨界プラズマ試験装置（以下JT-60と略記する¹⁾）の建設に着手している。

JT-60の主要機器の一つであるトロイダル磁場コイルは18個の単位コイルより構成され、トーラス状のプラズマを安定化させるためトロイダル方向に一様な強磁場を発生させる機能を有する。単位コイル巻数36ターンのパンケーキコイル2個より成り、形状は内半径1970mm外半径2780mmの円形常電導コイルである。また、空間的制約から本コイルはトーラス中心側でテーパ状に切欠かれたセクタ形となっている。Fig. 1に単位コイルの全体図を、Fig. 2にコイル導体の断面図を、Table 1にコイル諸元をそれぞれ示す。実機コイルの製作に先立って導体接続に関する試作開発を実施し、治具の開発、作業工程管理法および検査システム等において一応の満足すべき結果を得た。²⁾採用し得る治金的接続法は電氣的機械的性能への影響および作業性等の判断からロウ付および溶接とする。溶接に関する報告は別報に譲り、本報においてはロウ付を対象とする。

文献2)にも述べているが、ロウ付法というのは接続すべき母材金属よりも低融点の金属（ロー材）を溶融し、毛管現象を利用して間隙を充填し、固液相間の漏れ現象により金属結合（例えば固溶体形、共晶形、金属間化合物）を生成させるものである。Fig. 3にロー付法の略図を示す。基本的には試作開発で得た技術を実機製作に適用することになり変わらないが、ロー材の供給方法に改善を施した。すなわち、試作開発においては銅製の発泡金属にロー材を真空含浸させ厚さ約1mmにプレスした「複合ロー材」を用いたが、実機においては厚さ0.6mmの置きロウおよび溶融時のロー材流出による減少分を考慮して $\phi 1.6\text{mm} \sim \phi 2.4\text{mm}$ の挿しロウを行う。試作開発の方式に比較して、実機方式の方が発生ボイドが少なくかつ作業性を優れている。

以下2章に探傷機器の性能を含めて検査システムについて述べ、3章にて強度評価を行い、4章にて探傷機器の性能および強度評価の結果等を充分踏まれて設定した合否判定基準を述べる。さらに、現在既に完了している1000箇所以上のロウ付部の検査結果を述べ本ロウ付部が充分高い信頼性を有する事を明らかにし5章の結論とする。

2. 検査システム

設計からロウ付箇所要求される性能を発揮し得ることを確認するために検査システムの確立は必須である。採用すべき検査方法は非破壊検査の中より選択されねばならず、破壊力学的手法を設計技術に取り入れるためには非破壊検査による欠陥の定量的情報を高い精度で知ることが不可欠である。JT-60トロイダル磁場コイルのロウ付箇所は2000箇所にも及ぶため作業能率の観点から応答速度が速く自動化の容易な超音波探傷法を採用した。従来から超音波探傷法の欠点として、記録性に乏しい等が指摘されている。本検査のために新たに自動超音波探傷

装置を開発し、これら欠点を克服した。

2.1 検査方法

ロウ付部超音波探傷法の概念図および探傷条件を Fig. 4 に示す。超音波ビームをロウ付面に垂直入射し、欠陥反射波を検出する。探触子は自動的に走査され、結果は Photo. 1 に示すように、ストレージスクリーン上に欠陥像と欠陥面積率が表示される。Photo. 1 における A-A 断面および B-B 断面の顕微鏡写真をそれぞれ Photo. 2a および Photo. 2b に示す。

2.2 実際欠陥と表示欠陥の対応

探傷器機の欠陥検出能力の把握および実際欠陥と表示欠陥の対応関係を明らかにしておくことは、判定基準の設定および強度評価にとって必要不可欠である。

以下実際欠陥と表示欠陥の対応関係を明らかにすべく、Fig. 5 に示す既知欠陥を有する試験サンプルの欠陥エコーを分析する。

Photo. 3a に規定探傷感度 (Fig. 4 参照) にて探傷した場合の欠陥エコーの A スコープ走査グラフを、欠陥像を C スコープにそれぞれ示す。また規定探傷感度から 6dB 下げて探傷した場合の欠陥エコーの A スコープ走査グラフおよび C スコープ上の欠陥像を Photo. 3b に示す。規定探傷感度および 6dB 下げた探傷感度の欠陥エコーの欠陥径依存性を Fig. 6 に示す。これによると、規定探傷感度では ϕ 3mm 相当以上、6dB 下げた探傷感度では ϕ 6mm 相当以上の欠陥については検出可能である。

ここで欠陥面積率について実際と表示との比較を行う。Photo. 2a および Photo. 2b から規定探傷感度では欠陥面積率 $S_{60} = 4.7\%$ であり、6dB 下げた探傷感度では、 $S_{54} = 3.1\%$ である。一方実際の欠陥面積率は Fig. 5 より算出して、 $S_0 = 3.58\%$ となる。したがって規定探傷感度で探傷した場合、安全側の評価となる。

ただし次の事に留意する必要がある。すなわち、約 3mm ϕ 以下の欠陥がロウ付面に一様に存在し、かつ欠陥面積率が 3 ~ 4% を超えなければ表示欠陥面積率はゼロとなり、一方欠陥面積率が 3 ~ 4% を極くわずわでも超えると表示欠陥面積率は 100% に近い値となる。規定探傷感度および 6dB 下げた探傷感度で探傷する場合の表示欠陥面積率と実際欠陥面積率との比較をすべく多少一般化した模式図を Appendix A に示す。

一方、単独欠陥の大きさを評価する場合、過度に安全側の評価とならないように、規定の探傷感度から 6dB 下げて走査したときの C スコープ像から判断する。判断基準として Photo. 3b を採用する。単独欠陥に関して本評価法の妥当性を Appendix B に示す。

3. 強度評価

強度評価は2つの観点に行う。第一の観点として、静的強度の立場からロウ付部が母材部に比して有意の劣性を示さない範囲で許容欠陥面積率を設定し、かつ使用上問題のないことを明らかにする。第二の観点として、疲労強度の立場からロウ付部に生じる初期欠陥が使用期間中に成長し破断に至る事のないことを明らかにする。

3.1 応力評価

強度評価の前提となる応力解析は明確な荷重解析に立脚したものでなければならない。JT-60トロイダル磁場コイルに作用する荷重形態は自己電磁力(フープ力)および垂直磁場による転倒力とその主なものであり、プラズマとの相互作用はほとんどなく比較的単純であるため、その把握が容易である。一方応力解析手法についてはトロイダル磁場コイルR&Dの一環として実施した $1/5$ モデル試験および実機大モデル試験を通じてその妥当性を確立している²⁾。

ロウ付部各層の応力分布の例をFig. 7およびFig. 8に示す。Table 2にプラズマ異常消滅の場合を含めて、ロウ付部における最大応力の生じるターン(最外周ターン)の主応力および応力強さを示す。コイル通电の際にジュール熱が発生するのは不可避免的であり、従って強度評価に供する応力は熱応力を考慮したTable 2の下欄の値を使用する。

Table 2 Maximun Stress at Brazed joints

	Normal			Plasma Disruption		
	σ_{θ}	σ_r	σ ※	σ_{θ}	σ_r	σ ※
Without thermal Stress	1.76 ∟ 3.20	-0.34 ∟ -0.22	2.10 ∟ 3.42	0.89 ∟ 4.07	-0.35 ∟ -0.21	1.24 ∟ 4.28
With thermal Stress	1.56 ∟ 3.00	-0.87 ∟ -0.75	2.43 ∟ 3.75	0.69 ∟ 3.87	-0.88 ∟ -0.74	1.57 ∟ 4.61

※ Stress Intensity Unit : kg/mm²

3.2 静的強度

欠陥面積率の引張強さに及ぼす影響を調べるため、Photo. 4にその超音波探傷試験結果を示すロウ付部から異なる欠陥面積率を有するように3つのサンプルを切り出し、各々引張試験を行った。各々サンプルの欠陥面積率および引張強さをTable 3に示す。

Table 3 Dependence of Tensile Strength on Defect ratio

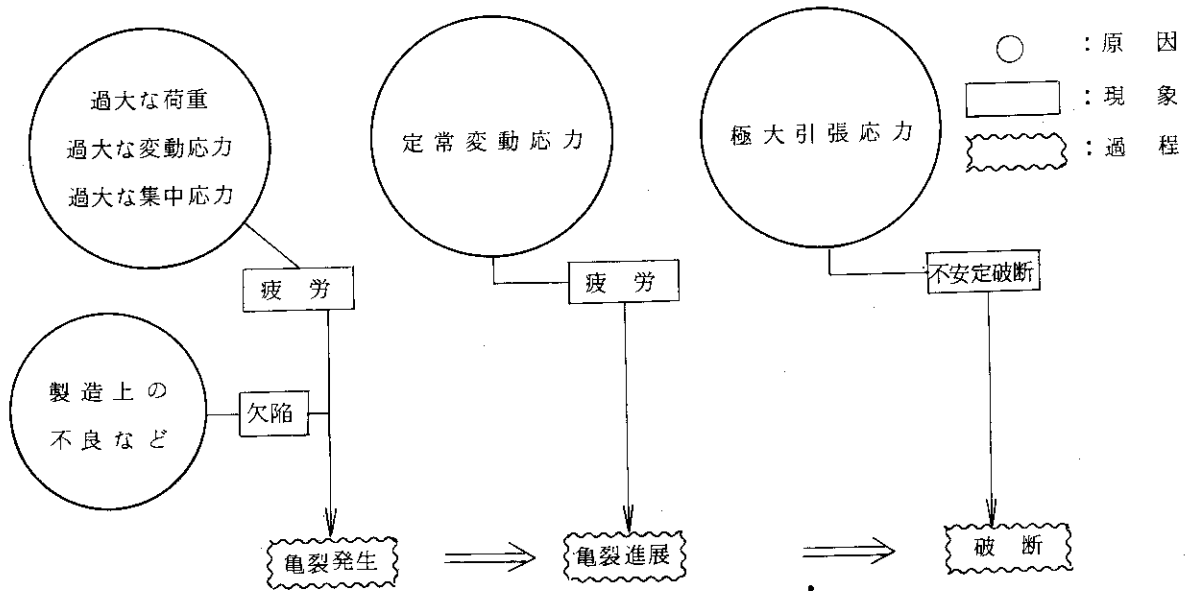
Position	Defect ratio (%)	Tensile strength (kg/mm ²)
A	11.1	21.9
B	20.4	21.8
C	31.2	21.1

C部の破断強度はA, Bに比して0.7~0.8 kg/mm²程度低下しているが、導体材料そのものの引張強度が0.5 kg/mm²程度の標準偏差(処理データ約200)を有する正規分布をなすことからTable 3に示す程度の差は材料間のバラツキの範囲内と考えられる。

さらに、超音波探傷による欠陥部に相当する位置のロウ付層には若干の開口が認められるものの、A, BおよびC部のいずれも母材で破断している。

3.3 疲労強度

一般的には下の流れ図に示すように、亀裂発生および亀裂進展の原因となる応力形態はそれぞれ異なる。いわゆる低い応力レベルでは亀裂進展の原因とは成り得ても、亀裂発生の原因とは成らない。つまり疲労破壊にとってのトリガーの役割を発生した亀裂が担うと考えられるので、既に初期亀裂を有する部材の強度評価に当っては確度の高い手法を採用する必要がある。



破壊原因のメカニズム

亀裂の進展による材料の破壊挙動も近年発展しつつある破壊力学によれば、計算による高精度の応力解析結果が得られる場合には、その数値を基に十分な強度評価の出来得る状況となり

つつある。数理的弾性論によれば、亀裂先端近傍における応力状態は一種の特異性を有しており、この特異性の強さを示す工学量として応力拡大係数 K の導入がなされ、この数値の持つ重要性から数多くの研究者により各種の実用的な物体形状、荷重条件に対して精力的にその解析が行われつつある。^{5,6,7,8,9)}

3.3.1 亀裂進展特性試験

破壊力学的立場からロウ付部の許容欠陥の大きさ等を検討する上で必要な破壊力学上の諸特性(亀裂進展速度、限界応力拡大係数等)を求めるため、Fig. 9 に示す試験片を用いて試験を実施した。図中の初期欠陥は電子ビームによる慣通穴である。印加荷重は導体長手方向に片振り繰り返し荷重として与えた。Photo. 5 に示す破断状況からも明らかなように疲労亀裂は最大主応力の方向に、すなわちロウ付面に沿ってではなく、OFC, AGOFCの両母材側に向って進展する。Fig. 10 に亀裂進展特性試験の結果を示す。ロウ付部の亀裂進展速度について、OFCおよびAGOFCの両者間に有意差は認められず、O材の場合、限界応力拡大係数は $\Delta K_{tw} = 12.8 \text{ kg/mm}^{3/2}$ である。Fig. 10 を作成するために用いた応力拡大係数の計算手法は簡単のため、有効亀裂長さとして、荷重方向に対する実際亀裂の投影長を採用した。今、仮にこの計算手法を簡便法と名付け、以下 K_I , K_{II} モードに展開して亀裂先端の応力拡大係数を求める手法と簡便法¹⁰⁾との比較を行う。

Fig. 9 に示すように

σ (kg/mm ²)	:	片振り荷重による最大応力値
$2a$ (mm)	:	初期欠陥の実長
W (mm)	:	試験片の幅
α (度)	:	ロウ付面の導体長手法とのなす角
θ_M (度)	:	文献10)による亀裂進展方向

とする。

i) 簡便法

初期欠陥の投影長を $2d$ とすると、

$$2d = 2a \sin \alpha + 2$$

となり、ここで右辺第2項は試験開始に先立って、過大応力を加えて発生させた亀裂の長さである。

中央亀裂を有する帯板の引張りに対して、応力拡大係数 K は、

$$K = \sigma \sqrt{\pi d} F(\lambda), \quad \lambda = \frac{2d}{W}$$

で表わされる。上式、 $F(\lambda)$ についての精度の高い経験式¹¹⁾

$$F(\lambda) = \sqrt{\sec \frac{\pi \lambda}{2}} \quad (\lambda \leq 0.8)$$

が提案されている。

したがって次の式が導かれる。

$$K = \sigma \sqrt{\frac{\pi (a \sin \alpha + 1)}{\cos \frac{\pi (a \sin \alpha + 1)}{W}}} \quad (1)$$

ここで

$$a = 7.5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 16.4^\circ$$

$$W = 340 \text{ mm}$$

であり、荷重形態が完全片振りであることから、①式より、

$$\Delta K = 3.198 \sigma \quad (\text{kg/mm}^{3/2}) \quad (2)$$

となる。

ii) モード展開による方法

初期欠陥のロウ付面における有効長を $2d$ とすると、

$$2d = 2a + \frac{2}{\sin \alpha}$$

となり右辺第2項は i) での説明と同様である。

開口モード K_I および面内剪断モード K_{II} はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$K_I = \sigma_1 \sqrt{\frac{\pi d}{\cos \frac{\pi d \sin \alpha}{W}}}$$

$$K_{II} = \tau_1 \sqrt{\frac{\pi d}{\cos \frac{\pi d \sin \alpha}{W}}}$$

ここで σ_1 , τ_1 はそれぞれ $\sigma_1 = \sigma \sin^2 \alpha$ および $\tau_1 = \sigma \sin \alpha \cos \alpha$ で表わせる。

a , α および W の値は i) と同じであるから、

$$K_I = 0.474 \sigma \quad (\text{kg/mm}^{3/2}) \quad (3)$$

$$K_{II} = 1.601 \sigma \quad (\text{kg/mm}^{3/2}) \quad (4)$$

K_I , K_{II} の混合モード下での最大主応力方向 θ_M 方向の応力拡大係数 K_M はそれぞれ下式で示される。

$$\theta_M = \pm \cos^{-1} \left(\frac{3 K_{II}^2 + K_I \sqrt{8 K_{II}^2 + K_I^2}}{9 K_{II}^2 + K_I^2} \right) \quad (5)$$

$$K_M = \cos \frac{\theta_M}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta_M}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_M \right) \quad (7)$$

③, ④を⑤式に代入して, $\theta_M = \pm 65^\circ$ を得る。

大きい方の応力拡大係数を与える方向 $\theta_M = -65^\circ$ を採用し, 荷重形態を考慮した上で③, ④式を⑦式に代入して,

$$\Delta K_M = 2.12\sigma \quad (\text{kg}/\text{mm}^{3/2}) \quad (8)$$

以上 i), ii) の比較から次のことが明らかとなった。すなわち簡便法により作成した Fig.10 を設計に用いるなら, モード展開法によって算出したロウ付部欠陥の応力拡大係数に補正係数 1.5 ($\Delta K / \Delta K_M$) を乗じた値を採用する必要がある。したがって, 限界応力係数 (ΔK_{th}) の値以下で設計する必要があるれば, モード展開法で計算した応力拡大係数に 1.5 を乗じた値が $\Delta K_{th} = 12.8 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$ を越えてはならない。

3.3.2 初期欠陥における応力拡大係数の評価

疲労強度の観点から許容できる単独欠陥の大きさを設定するために, その大きさを未知数とした欠陥に Table 2 の応力が作用する場合の応力拡大係数を算出する。計算モデルおよび用いる記号を Fig. 11 に示す。

円板亀裂を有する無限体の 2 軸引張りモデルの応力拡大係数は M. K. Kassir¹²⁾ らによって下

$$K_I = 2 \sigma \sqrt{\frac{a}{\pi}} (\sin^2 \alpha + \beta \cos^2 \alpha) \quad (9)$$

$$K_{II} = \frac{4\sigma}{2-\nu} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cos \theta (1-\beta) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

K_I は亀裂の縁全周において作用し, K_{II} は Fig. 11 中 A 点において作用する。また⑨, ⑩式の σ , β および ν はそれぞれ Fig. 11 の記号との関係で示すと, $\sigma = \sigma_\theta$, $\beta = \sigma_r / \sigma_\theta$ およびポアソン比である。

K_I , K_{II} の混合モードに対する亀裂先端の最大主応力の方向 θ_{max} およびこの方向に対応する応力拡大係数 $K_{\theta_{max}}$ はそれぞれ以下の⑪式および⑫式によって表わされる。

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{3 K_{II}^2 + K_I \sqrt{8 K_{II}^2 + K_I^2}}{9 K_{II}^2 + K_I^2} \right) \quad (11)$$

$$K_{\theta_{\max}} = \cos \frac{\theta_{\max}}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta_{\max}}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_{\max} \right) \quad (12)$$

ここで、許容欠陥の大きさ(2a)を未知数として

$$\sigma = 3.0 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_r = 0.75 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$\alpha = 18.43^\circ$$

等を⑨～⑫式に代入して

$$K_I = -0.44 \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2}$$

$$K_{II} = 1.5 \cos \theta \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2} \quad (\theta = 0^\circ \text{ で最大値 } K = 1.5\sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2})$$

$$\theta_{\max} = \pm 76.2^\circ$$

$$K_{\theta_{\max}} = 1.503 \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2} \quad (\theta_{\max} = -76.2^\circ \text{ に対して})$$

をそれぞれ得る。

片張り荷重であることを考慮し、先に求めた補正係数 1.5 を乗じて、 $\Delta K_{\theta_{\max}} = 2.25 \sqrt{a}$ $\text{kg/mm}^{3/2}$ を得る。したがって亀裂が進展しないための必要条件の一つとして、下式が得られる。

$$a < 32.4 \text{ mm} \quad (13)$$

上記検討結果を基本として、以下プラズマが異常消滅した場合、欠陥が偏心している場合および欠陥間の干渉についてそれぞれ考察する。

1) プラズマの異常消滅

プラズマ電流が急速に消滅し、真空容器に流れる電流が減衰した後もポロイダル磁場が存在しており、通常時より大きい転倒力がトロイダル磁場コイルに作用する。(プラズマ立上げ時にプラズマ電流が発生せず、ポロイダル磁場は発生し、真空容器に流れる電流が減衰してしまった場合も同様である。

これらの場合、ロウ付部に作用する最大応力は、Table 2 に示すように周方向応力 $\sigma_\theta = 3.87 \text{ kg/mm}^2$ および半径方向応力 $\sigma_r = -0.74 \text{ kg/mm}^2$ である。さらに欠陥の大きさ a を未知数として、 $\alpha = 18.43^\circ$ および $\nu = 0.3$ を⑨～⑫式に代入して

$$K_I = -0.3 \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2}$$

$$K_{II} = 1.84 \cos \theta \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2} \quad (\theta = 0^\circ \text{ で最大値 } K = 1.84 \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2} \text{ を与える。})$$

$$\theta_{\max} = \pm 73.8^\circ$$

$$K_{\theta_{\max}} = 1.92 \sqrt{a} \text{ kg/mm}^{3/2} \quad (\theta = -73.8^\circ)$$

を得る。

片振り荷重であることを考慮し、先に求めた補正係数 1.5 を乗じて、 $\Delta K_{\theta_{\max}} = 2.88 \sqrt{a}$ $\text{kg/mm}^{3/2}$ を得る。したがって亀裂が進展しないための必要条件の一つとして、下式が得られ

る。

$$a < 19.8 \text{ mm} \quad (14)$$

ii) 欠陥の偏心

欠陥の偏心についての検討はASME SECTION XIに準じて行なう。そこで、ロウ付部に生ずる円板状欠陥をFig. 12に示す如くモデル化した場合、先の基本検討で明らかのように最大の応力係数を与える方向は導体の板厚方向であり、従って検討すべき偏心の方向は導体の板厚方向で十分である。

導体の接続に供するロウ材は板状の置きロウのほかに周囲から、棒状の $\phi 1.6 \text{ mm} \sim \phi 2.4 \text{ mm}$ の挿しロウも含まれることは既に述べた。従って接続面の端部領域10ミリ以内に欠陥の生じることはないものと考えられる。

今、 $c = 10 \text{ mm}$ と仮定すれば $\alpha = 18.43^\circ$ より $h \doteq 3 \text{ mm}$ となる。

Fig. 13に示すASME SECTION XIの偏心に対する修正係数を読みとるために知る必要のある値は $\frac{2a}{t}$ および $\frac{2e}{t}$ である。ところが、 $h = 3 \text{ mm}$ が与えられており $t = 34.0 \text{ mm}$ であるから修正係数は a のみの関数 $f(a)$ として表わせる。

従って、通常応力下において許容し得る欠陥の大きさ(2d)は下式を満足する必要がある。

$$2.25\sqrt{d} \cdot f(a) < 12.8 \quad (15)$$

ただし $a = d \sin \alpha$ で $\alpha = 18.43^\circ$ である。

⑮式とFig. 14から

$$d \leq 23 \text{ mm} \quad (16)$$

が得られる。

一方、プラズマ異常消滅時の応力下において許容し得る欠陥の大きさ(2d)は下式を満足する必要がある。

$$2.88\sqrt{d} \cdot f(a) < 12.8 \quad (17)$$

ただし通常応力下同様 $a = d \sin \alpha$ で $\alpha = 18.43^\circ$ である。

⑰式とFig. 14から

$$d \leq 15 \text{ mm} \quad (18)$$

iii) 欠陥間の干渉

無限個の等長の欠陥が一直線上に等間隔で分布している場合等単純な二次元モデルにおける欠陥間の干渉についての研究は幾つかあるが、本ロウ付部のように各欠陥の亀裂の進展方向が同一直線上にない場合等いわゆる三次元問題の欠陥間の干渉に関する研究はほとんどない。

従ってここでは定性的な考察を行うに止める。すでにii)欠陥の偏心で述べたように欠陥から亀裂の進展する方向、すなわち応力拡大係数の角度依存性を考慮すれば導体の幅方向の欠陥間干渉は無視し得る。

を考慮すれば亀裂の進展は生じないものと考えられる。

- 単独欠陥探傷用に 6 dB 下げた探傷感度において空間分解能は最高 5～6 mm 程度である。
- 空間分解能は欠陥の大きさの減少関数である。
- 亀裂の進展方向は同一直線上にない。

4. 合 否 判 定 基 準

設定すべき合否判定基準は、2章において明らかにした探傷機器の欠陥検出能力および実際欠陥の対応関係を充分踏まえ、3章の強度評価の結果と首尾一貫したものでなければならない。具体的には以下の点を考慮して、合否判定基準の設定に至った。

- 表示される単独欠陥の大きさについては、Appendix A および B から判断して過大評価の可能性はないものと考えられる。
- ⑬, ⑭, ⑯ および ⑰ の各式はすべて限界応力拡大係数未満の領域と対応している。
- Fig. 11 のデータはバラツキが小さい。
- 最大応力の生じるターンの応力値を強度評価に用いており、他のターンの応力値はそれに比べて小さい。(Fig. 7, 8 参照)
- 通常運転に比べて高い応力を生じせしめるプラズマの異常消滅現象の頻度は仕様で全体の 25% (12500 回) と規定している。
- 検査能率の観点から複雑な判定基準は望ましくない。

以下、合否判定基準を述べる。

i) 欠陥面積率

規定探傷感度にてロウ付部全面を探傷し、C スコープ欠陥面積率表示装置に数値表示される欠陥面積率をもって合否を判定する。欠陥面積率が 30% を越えるロウ付部は不合格とし、再ロウ付を行う。

ii) 単独欠陥の大きさ

規定探傷感度にて欠陥面積率が 1% (単独欠陥換算で $\phi 13\text{mm} \sim \phi 20\text{mm}$ 相当) を越える場合に探傷感度を 6 dB 下げて再探傷を行い、C スコープに表示された欠陥像を単独欠陥とする。この際、Photo. 3 b の C スコープ欠陥像の大きさと比較し、実際欠陥の大きさを推定する。推定された単独欠陥の大きさが $\phi 30\text{mm}$ を越える場合、そのロウ付部を不合格とし、再ロウ付を行う。

5. 結 論

以上、JT-60 トロイダル磁場コイルのロウ付部に実施する超音波探傷試験の合否判定基準の妥当性について主に疲労強度の観点から超音波探傷装置の性能を充分踏まえた上で明らかにした。

- 単独欠陥探傷用に 6 dB 下げた探傷感度において空間分解能は最高 5～6 mm 程度である。
- 空間分解能は欠陥の大きさの減少関数である。
- 亀裂の進展方向は同一直線上にない。

4. 合 否 判 定 基 準

設定すべき合否判定基準は、2章において明らかにした探傷機器の欠陥検出能力および実際欠陥の対応関係を充分踏まえ、3章の強度評価の結果と首尾一貫したものでなければならない。具体的には以下の点を考慮して、合否判定基準の設定に至った。

- 表示される単独欠陥の大きさについては、Appendix A および B から判断して過大評価の可能性はないものと考えられる。
- ⑬, ⑭, ⑯ および ⑰ の各式はすべて限界応力拡大係数未満の領域と対応している。
- Fig. 11 のデータはバラツキが小さい。
- 最大応力の生じるターンの応力値を強度評価に用いており、他のターンの応力値はそれに比べて小さい。(Fig. 7, 8 参照)
- 通常運転に比べて高い応力を生じせしめるプラズマの異常消滅現象の頻度は仕様で全体の 25% (12500 回) と規定している。
- 検査率の観点から複雑な判定基準は望ましくない。

以下、合否判定基準を述べる。

i) 欠陥面積率

規定探傷感度にてロウ付部全面を探傷し、C スコープ欠陥面積率表示装置に数値表示される欠陥面積率をもって合否を判定する。欠陥面積率が 30% を越えるロウ付部は不合格とし、再ロウ付を行う。

ii) 単独欠陥の大きさ

規定探傷感度にて欠陥面積率が 1% (単独欠陥換算で $\phi 13\text{mm} \sim \phi 20\text{mm}$ 相当) を越える場合に探傷感度を 6 dB 下げて再探傷を行い、C スコープに表示された欠陥像を単独欠陥とする。この際、Photo. 3 b の C スコープ欠陥像の大きさと比較し、実際欠陥の大きさを推定する。推定された単独欠陥の大きさが $\phi 30\text{mm}$ を越える場合、そのロウ付部を不合格とし、再ロウ付を行う。

5. 結 論

以上、JT-60 トロイダル磁場コイルのロウ付部に実施する超音波探傷試験の合否判定基準の妥当性について主に疲労強度の観点から超音波探傷装置の性能を充分踏まえた上で明らかにした。

- 単独欠陥探傷用に 6 dB 下げた探傷感度において空間分解能は最高 5~6 mm 程度である。
- 空間分解能は欠陥の大きさの減少関数である。
- 亀裂の進展方向は同一直線上にない。

4. 合 否 判 定 基 準

設定すべき合否判定基準は、2章において明らかにした探傷機器の欠陥検出能力および実際欠陥の対応関係を充分踏まえ、3章の強度評価の結果と首尾一貫したものでなければならない。具体的には以下の点を考慮して、合否判定基準の設定に至った。

- 表示される単独欠陥の大きさについては、Appendix A および B から判断して過大評価の可能性はないものと考えられる。
- ⑬, ⑭, ⑯ および ⑰ の各式はすべて限界応力拡大係数未満の領域と対応している。
- Fig. 11 のデータはバラツキが小さい。
- 最大応力の生じるターンの応力値を強度評価に用いており、他のターンの応力値はそれに比べて小さい。(Fig. 7, 8 参照)
- 通常運転に比べて高い応力を生じせしめるプラズマの異常消滅現象の頻度は仕様で全体の 25% (12500 回) と規定している。
- 検査能率の観点から複雑な判定基準は望ましくない。

以下、合否判定基準を述べる。

i) 欠陥面積率

規定探傷感度にてロウ付部全面を探傷し、C スコープ欠陥面積率表示装置に数値表示される欠陥面積率をもって合否を判定する。欠陥面積率が 30% を越えるロウ付部は不合格とし、再ロウ付を行う。

ii) 単独欠陥の大きさ

規定探傷感度にて欠陥面積率が 1% (単独欠陥換算で $\phi 13\text{mm} \sim \phi 20\text{mm}$ 相当) を越える場合に探傷感度を 6dB 下げて再探傷を行い、C スコープに表示された欠陥像を単独欠陥とする。この際、Photo. 3b の C スコープ欠陥像の大きさと比較し、実際欠陥の大きさを推定する。推定された単独欠陥の大きさが $\phi 30\text{mm}$ を越える場合、そのロウ付部を不合格とし、再ロウ付を行う。

5. 結 論

以上、JT-60 トロイダル磁場コイルのロウ付部に実施する超音波探傷試験の合否判定基準の妥当性について主に疲労強度の観点から超音波探傷装置の性能を充分踏まえた上で明らかにした。

合否判定基準が要求される強度に対し必要十分条件を満足すべく木目の細かい判定基準の設定は現場の検査能率等を考慮すれば必ずしも有益ではない。従って既に述べた合否判定基準に対し少なくとも十分条件は満足するよう設定したものである。

現在まで1000箇所以上に及ぶロウ付作業が完了しており、以下検査結果を示して本論の締め括りとする。

- i) 欠陥面積率の度数分布は Fig. 14 に示す通りであり、大半のロウ付部について欠陥面積率はゼロである。
- ii) 単独欠陥大きさについては、 $\phi 6\text{mm} \sim \phi 10\text{mm}$ が18個 $\phi 10\text{mm} \sim \phi 15\text{mm}$ が1個存在するのみで、同一ロウ付部の欠陥最大数は $\phi 10\text{mm}$ が3個存在するのみである。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、終始有益な御意見、御指導を頂いた飯島勉 JT-60 第2 開発室長および太田充本体グループリーダーに感謝の意を表わします。

また応力拡大係数の評価について宮園昭八郎構造強度研究室長に有益な御意見を頂き、ここに感謝の意を表わします。

未筆ながら、亀裂進展速度の試験実施に当って、宇佐美三郎氏（日立製作所，日立研究所）および滝沢照広氏（日立製作所，核装置設計課）に御尽力頂き、併せてここに感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) M. Yoshikawa, et al ; Preprint 15 th Nat. Symp. on Atomic Energy (1977) 21-38
- 2) M. Ohkubo, et al ; J. At. Energy Soc. Japan, Vol. 20 No. 3 (1978) 195-206
- 3) K. Suzuki, I. Nanai et al ; Hitachi Hyoron, July (1979) 33-38
- 4) K. Koibuchi ; 昭和53年度エンジニアのための金属材料講習会テキスト，日本金属学会 関東支部
- 5) P. C. Paris, G. C. Sih ; Stress analysis of cracks, STP 381 ASTM(1965) 30-83
- 6) I. N. Sneddon, M. Lowengrub ; Crack problem in the classical theory of elasticity, Jam Wiley (1969)
- 7) G. C. Sih ; Methods of analysis and solution of crack problem, Noordhoff (1973)
- 8) H. Tada ; Stress analysis of cracks hand book, Del Research Cooperation (1973)

合否判定基準が要求される強度に対し必要十分条件を満足すべく木目の細かい判定基準の設定は現場の検査能率等を考慮すれば必ずしも有益ではない。従って既に述べた合否判定基準に対し少なくとも十分条件は満足するよう設定したものである。

現在まで1000箇所以上に及ぶロウ付作業が完了しており、以下検査結果を示して本論の締め括りとする。

- i) 欠陥面積率の度数分布は Fig. 14 に示す通りであり、大半のロウ付部について欠陥面積率はゼロである。
- ii) 単独欠陥大きさについては、 $\phi 6\text{mm} \sim \phi 10\text{mm}$ が18個 $\phi 10\text{mm} \sim \phi 15\text{mm}$ が1個存在するのみで、同一ロウ付部の欠陥最大数は $\phi 10\text{mm}$ が3個存在するのみである。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、終始有益な御意見、御指導を頂いた飯島勉 JT-60 第2 開発室長および太田充本体グループリーダーに感謝の意を表わします。

また応力拡大係数の評価について宮園昭八郎構造強度研究室長に有益な御意見を頂き、ここに感謝の意を表わします。

未筆ながら、亀裂進展速度の試験実施に当って、宇佐美三郎氏（日立製作所，日立研究所）および滝沢照広氏（日立製作所，核装置設計課）に御尽力頂き、併せてここに感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) M. Yoshikawa, et al ; Preprint 15 th Nat. Symp. on Atomic Energy (1977) 21-38
- 2) M. Ohkubo, et al ; J. At. Energy Soc. Japan, Vol. 20 No. 3 (1978) 195-206
- 3) K. Suzuki, I. Nanai et al ; Hitachi Hyoron, July (1979) 33-38
- 4) K. Koibuchi ; 昭和53年度エンジニアのための金属材料講習会テキスト，日本金属学会 関東支部
- 5) P. C. Paris, G. C. Sih ; Stress analysis of cracks, STP 381 ASTM(1965) 30-83
- 6) I. N. Sneddon, M. Lowergrub ; Crack problem in the classical theory of elasticity, Jann Wiley (1969)
- 7) G. C. Sih ; Methods of analysis and solution of crack problem, Noordhoff (1973)
- 8) H. Tada ; Stress analysis of cracks hand book, Del Research Cooperation (1973)

合否判定基準が要求される強度に対し必要十分条件を満足すべく木目の細かい判定基準の設定は現場の検査能率等を考慮すれば必ずしも有益ではない。従って既に述べた合否判定基準に対し少なくとも十分条件は満足するよう設定したものである。

現在まで1000箇所以上に及ぶロウ付作業が完了しており、以下検査結果を示して本論の締め括りとする。

- i) 欠陥面積率の度数分布は Fig. 14 に示す通りであり、大半のロウ付部について欠陥面積率はゼロである。
- ii) 単独欠陥大きさについては、 $\phi 6\text{mm} \sim \phi 10\text{mm}$ が18個 $\phi 10\text{mm} \sim \phi 15\text{mm}$ が1個存在するのみで、同一ロウ付部の欠陥最大数は $\phi 10\text{mm}$ が3個存在するのみである。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、終始有益な御意見、御指導を頂いた飯島勉 JT-60 第2 開発室長および太田充本体グループリーダーに感謝の意を表わします。

また応力拡大係数の評価について宮園昭八郎構造強度研究室長に有益な御意見を頂き、ここに感謝の意を表わします。

未筆ながら、亀裂進展速度の試験実施に当って、宇佐美三郎氏（日立製作所，日立研究所）および滝沢照広氏（日立製作所，核装置設計課）に御尽力頂き、併せてここに感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) M. Yoshikawa, et al ; Preprint 15 th Nat. Symp. on Atomic Energy (1977) 21-38
- 2) M. Ohkubo, et al ; J. At. Energy Soc. Japan, Vol. 20 No. 3 (1978) 195-206
- 3) K. Suzuki, I. Nanai et al ; Hitachi Hyoron, July (1979) 33-38
- 4) K. Koibuchi ; 昭和53年度エンジニアのための金属材料講習会テキスト，日本金属学会 関東支部
- 5) P. C. Paris, G. C. Sih ; Stress analysis of cracks, STP 381 ASTM(1965) 30-83
- 6) I. N. Sneddon, M. Lowergrub ; Crack problem in the classical theory of elasticity, Jam Wiley (1969)
- 7) G. C. Sih ; Methods of analysis and solution of crack problem, Noordhoff (1973)
- 8) H. Tada ; Stress analysis of cracks hand book, Del Research Cooperation (1973)

- 9) 石田 誠 ; き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館
- 10) F. Erdogan, G. C. Sih ; Journal of Basic Eng., Trans. ASME, Series D, Vol. 85 (1963), 519
- 11) C. E. Feddersen, ASTM STP, 410 (1967) 77.
- 12) M. K. Kassir, G. C. Sih, J. Appl. Mech. 33. 3 (1966 ~ 9) 601-611
- 13) G. R. Irwin, J. Appl. Mech., 24 (1957) 361
- 14) H. Tada, Engng. Frac. Mech, 2 (1970) 177.
- 15) E. Smith, Proc. Roy. Soc London 282 (1964) 422
- 16) 日本溶接協会, 原子力研究委員会・6AFC小委員会 JWES-AE-7707

Table 1 TF Coil Specification

Number of coil	18
Coil current.	52.1 KA
Total turn.	1296 turn
Coil major radius.	3.32 m
Coil inside radius.	1.94 m
Coil outside radius.	2.86 m
Field at plasma center.	45 KG
Maximum field in coil.	98 KG
Maximum power	342.3 MW
$1/2 LI^2$	2.85 GJ
Equivalent square wave pulse length.	38 sec
Total energy consumption per pulse.	9.87 GJ
Coil inductance L	2.1 H
Coil resistance R	97 mΩ
Coil time constant L/R	21.7 sec
Maximum current density.	26.8 A/mm ²
Forcing voltage.	6.57 KV
Flat top voltage.	5.05 KV

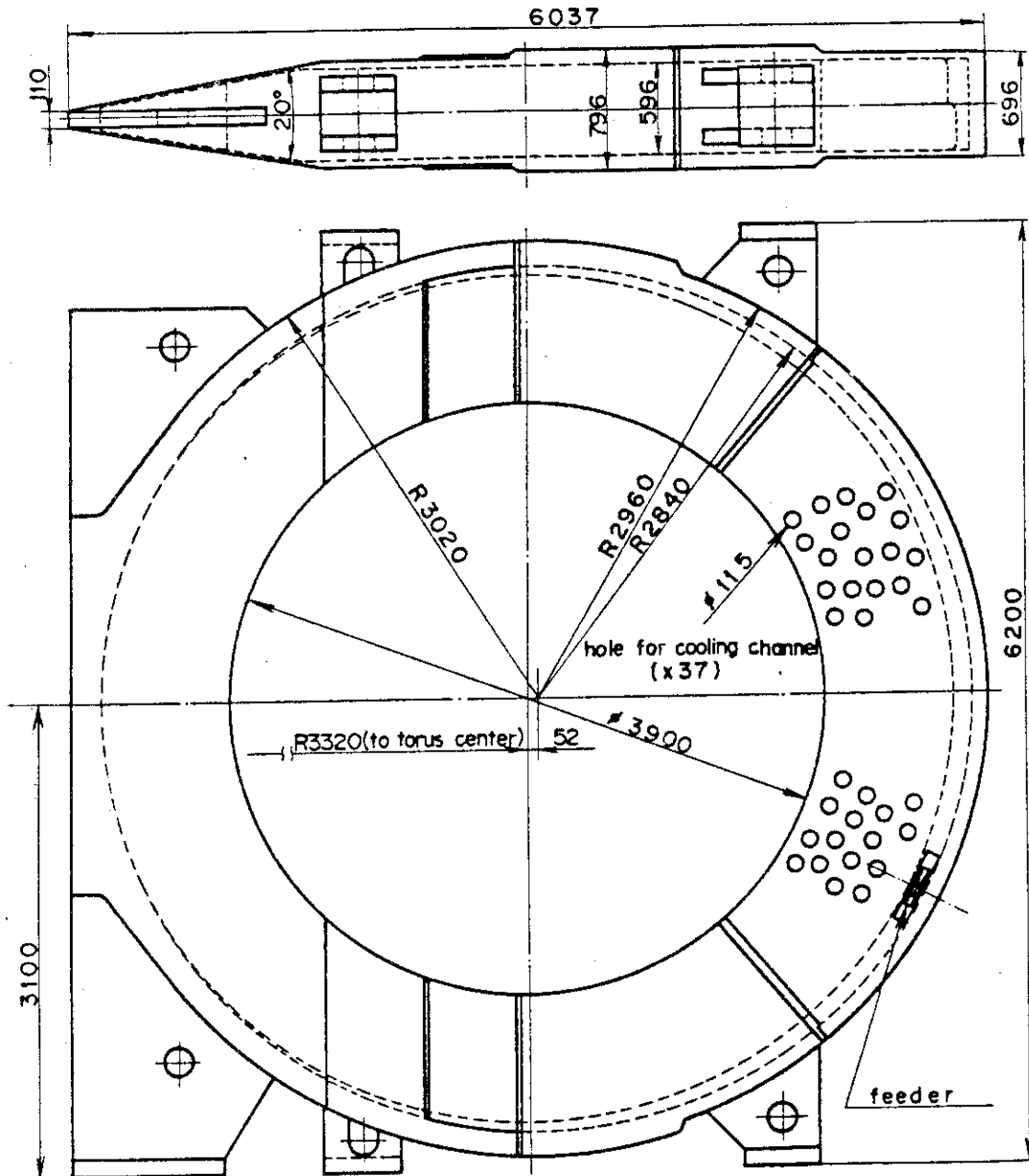


Fig. 1 Unit Toroidal Field Coil

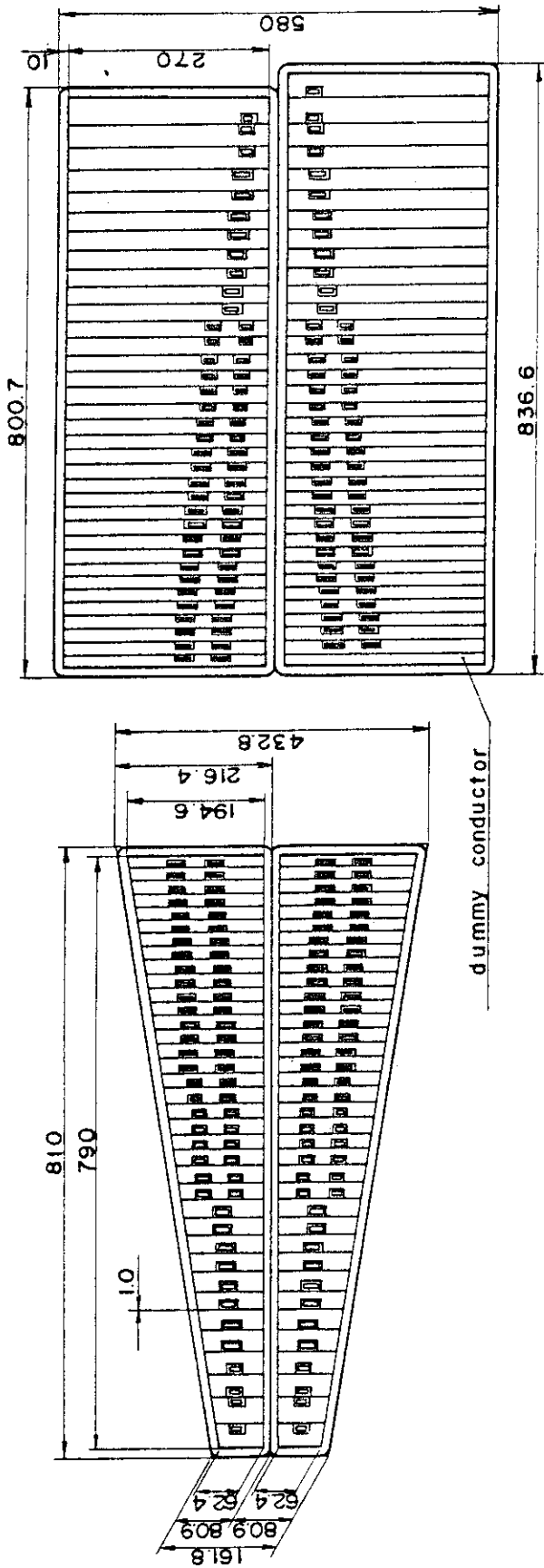


Fig. 2 Cross Section of Toroidal Field Coil

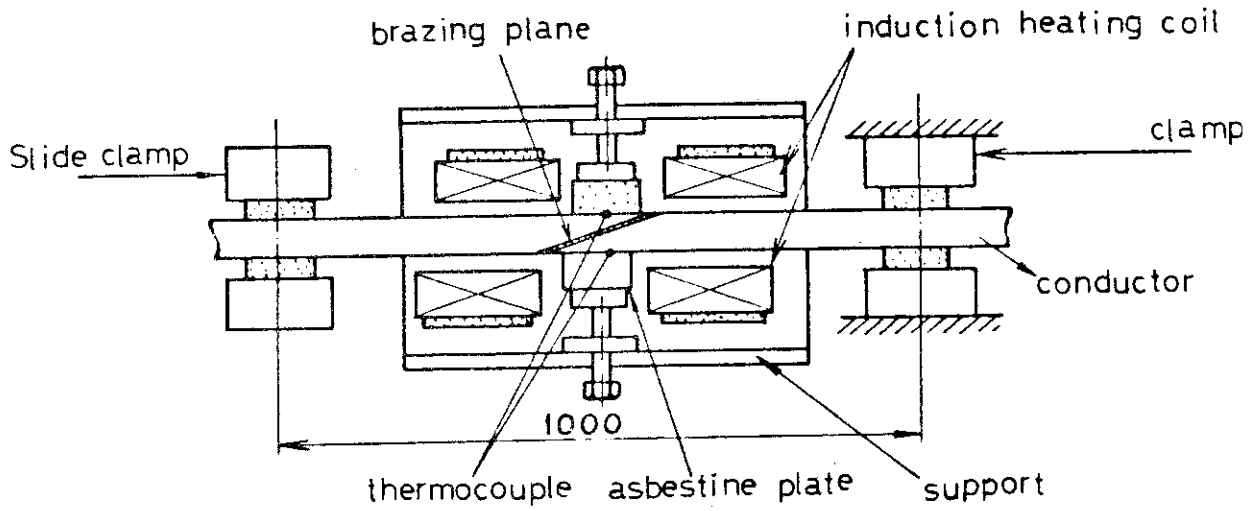


Fig. 3 Schema of Brazing Method

	inspection condition
sensor	twin-probe system size (10 x 10) frequency (5 MHz)
contacting method	contact mass (machine oil)
scanning interval	1 mm
scanning speed	60 mm / sec
detection sensitivity (regular)	8mm ϕ plane defect reflection : 100% (60dB) gate level : -12dB

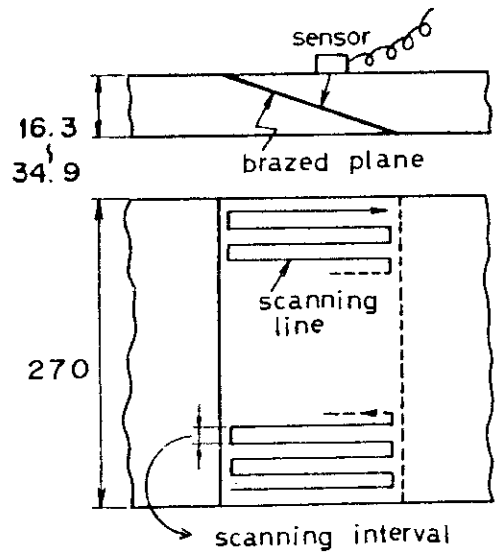


Fig. 4 Inspection Condition at Brazed Joint

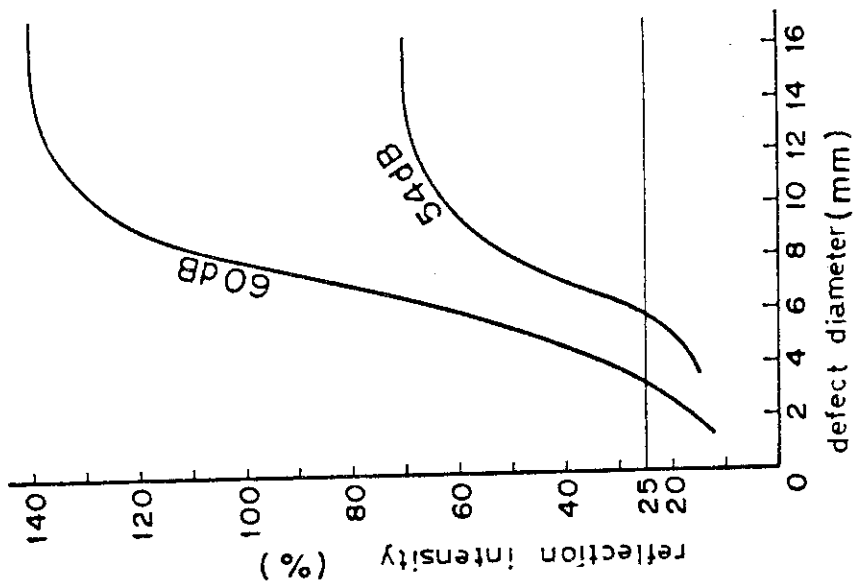


Fig. 6 Dependence of Reflection Intensity on Defect Diameter

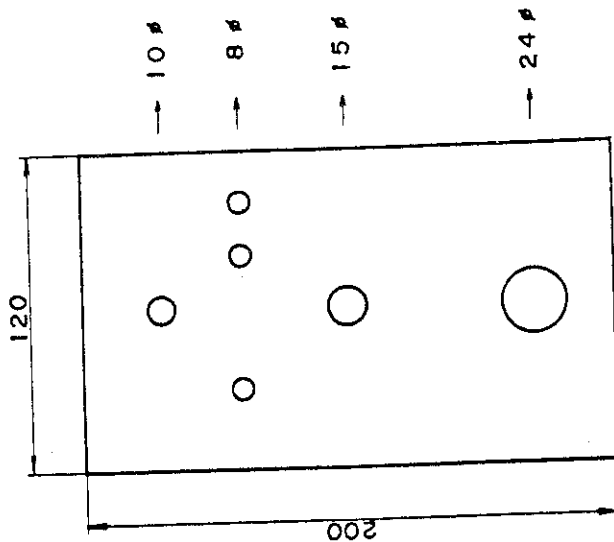


Fig. 5 Test Sample with Known Size Defect

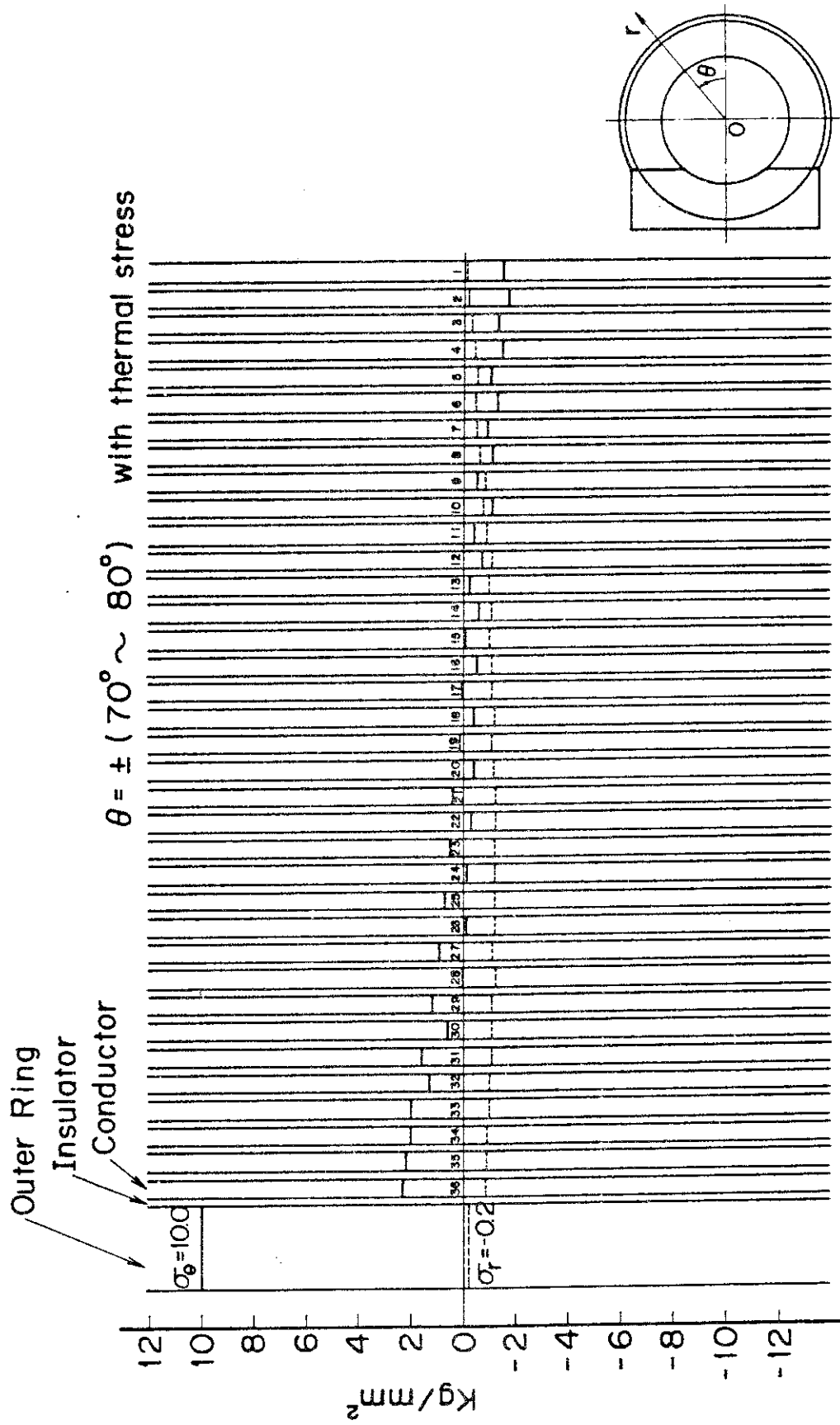


Fig. 7 Stress Distribution of Joints with Thermal Stress

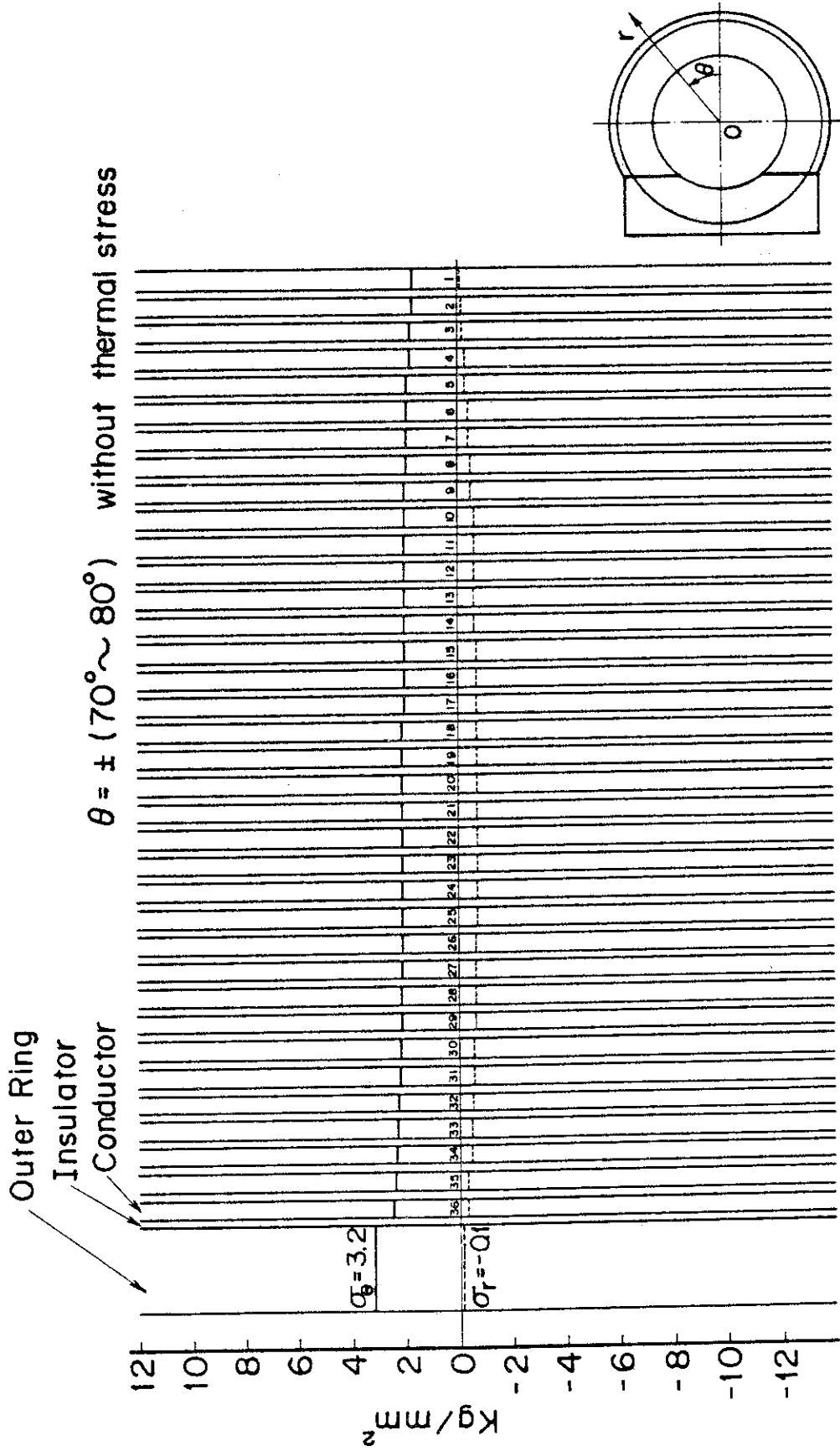


Fig. 8 Stress Distribution of Joints without Thermal Stress

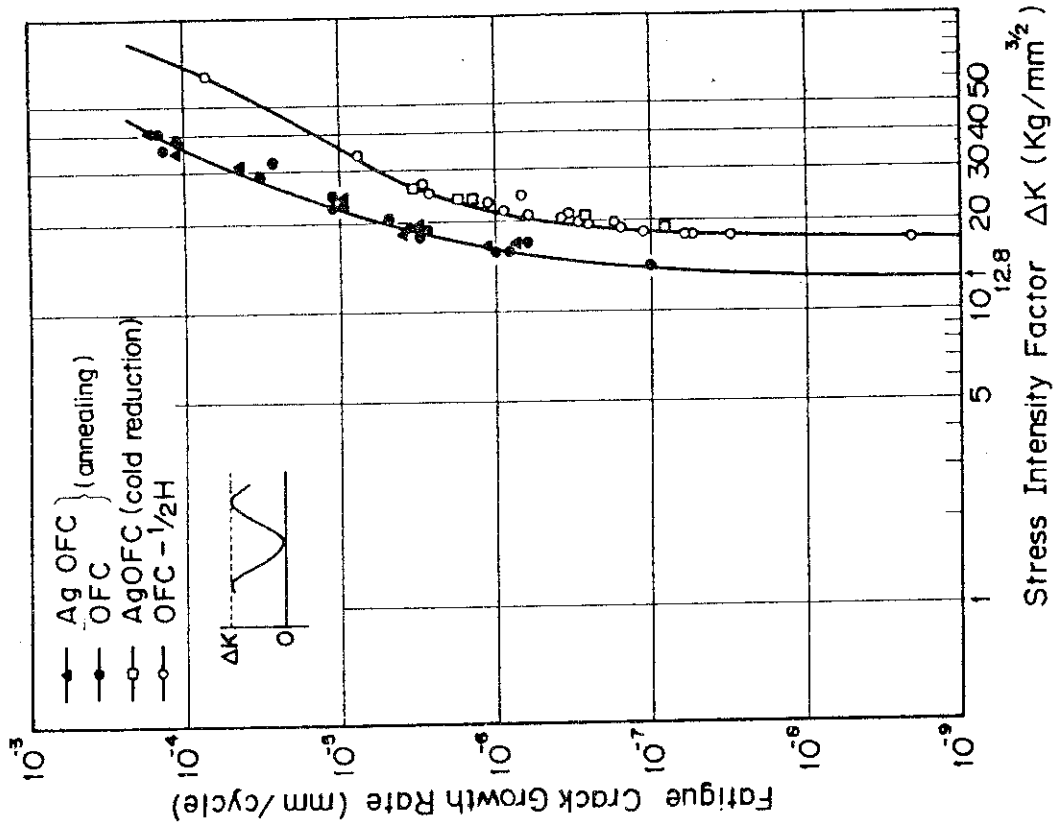


Fig. 10 Fatigue Crack Growth Rate in the Brazing Part

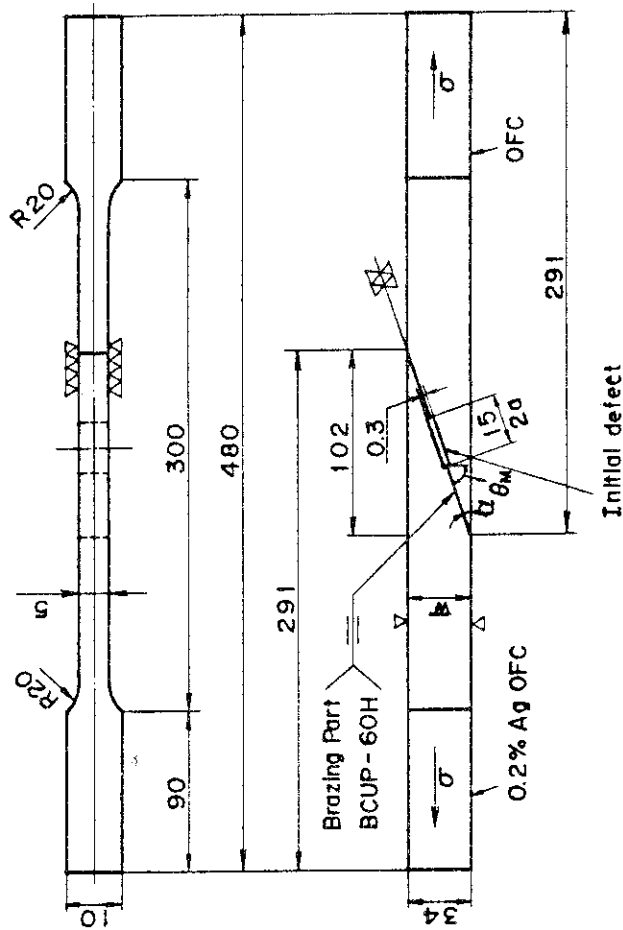


Fig. 9 Test Sample for Fatigue Crack Growth

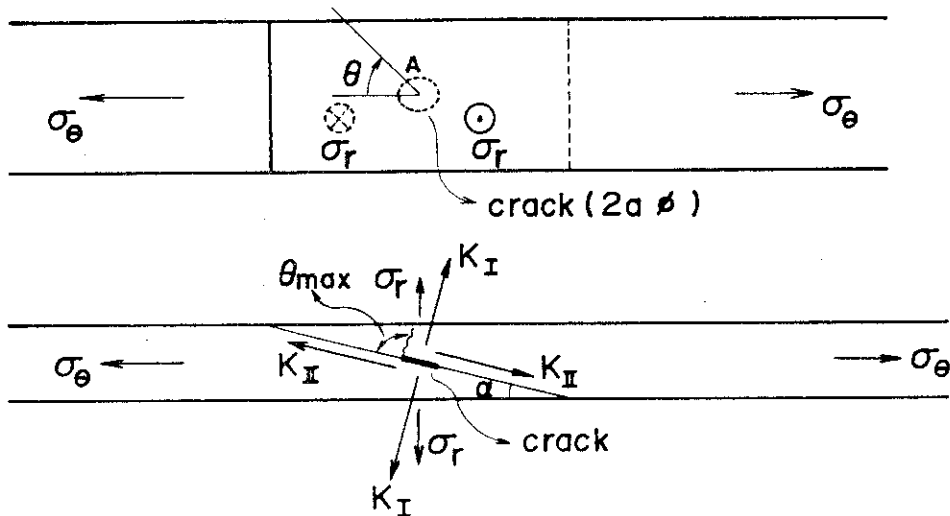
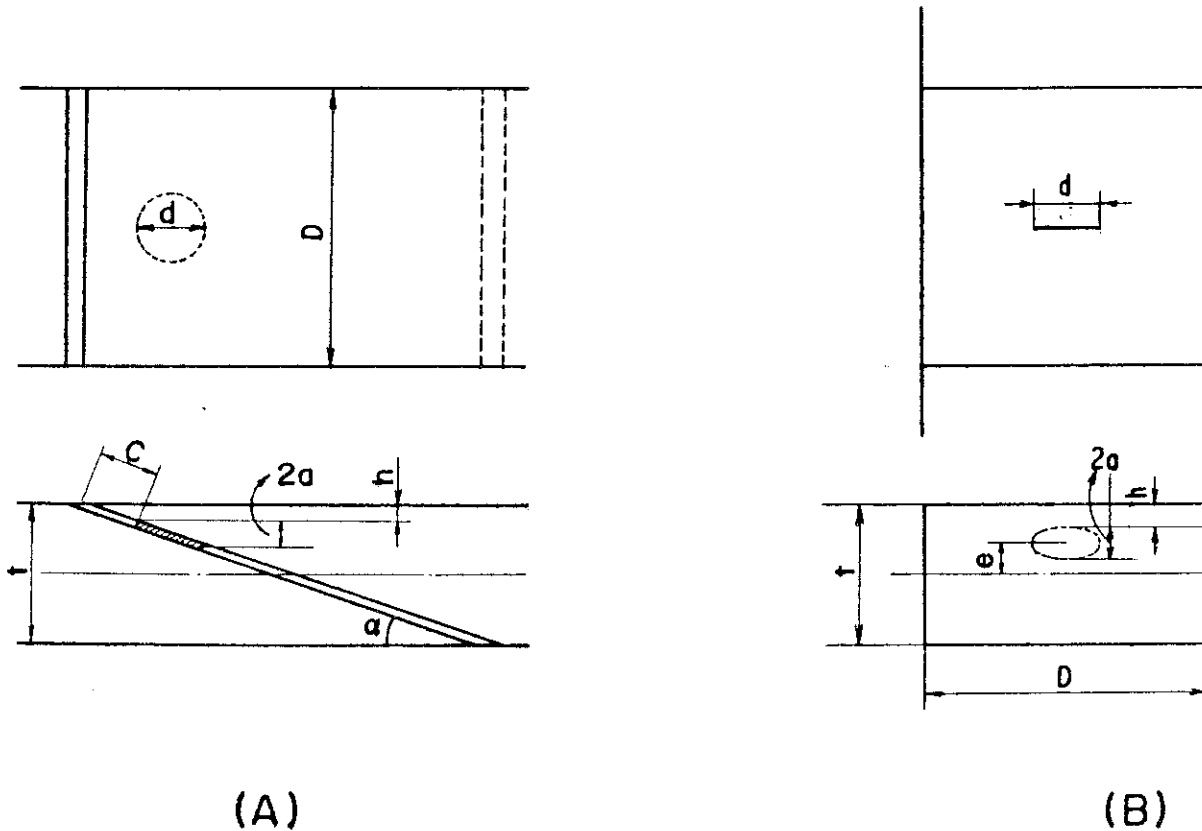


Fig. 11 Crack Model for Calculating Stress Intensity Factor



(A)

(B)

Fig. 12 Model of Deviated Defect from Centre

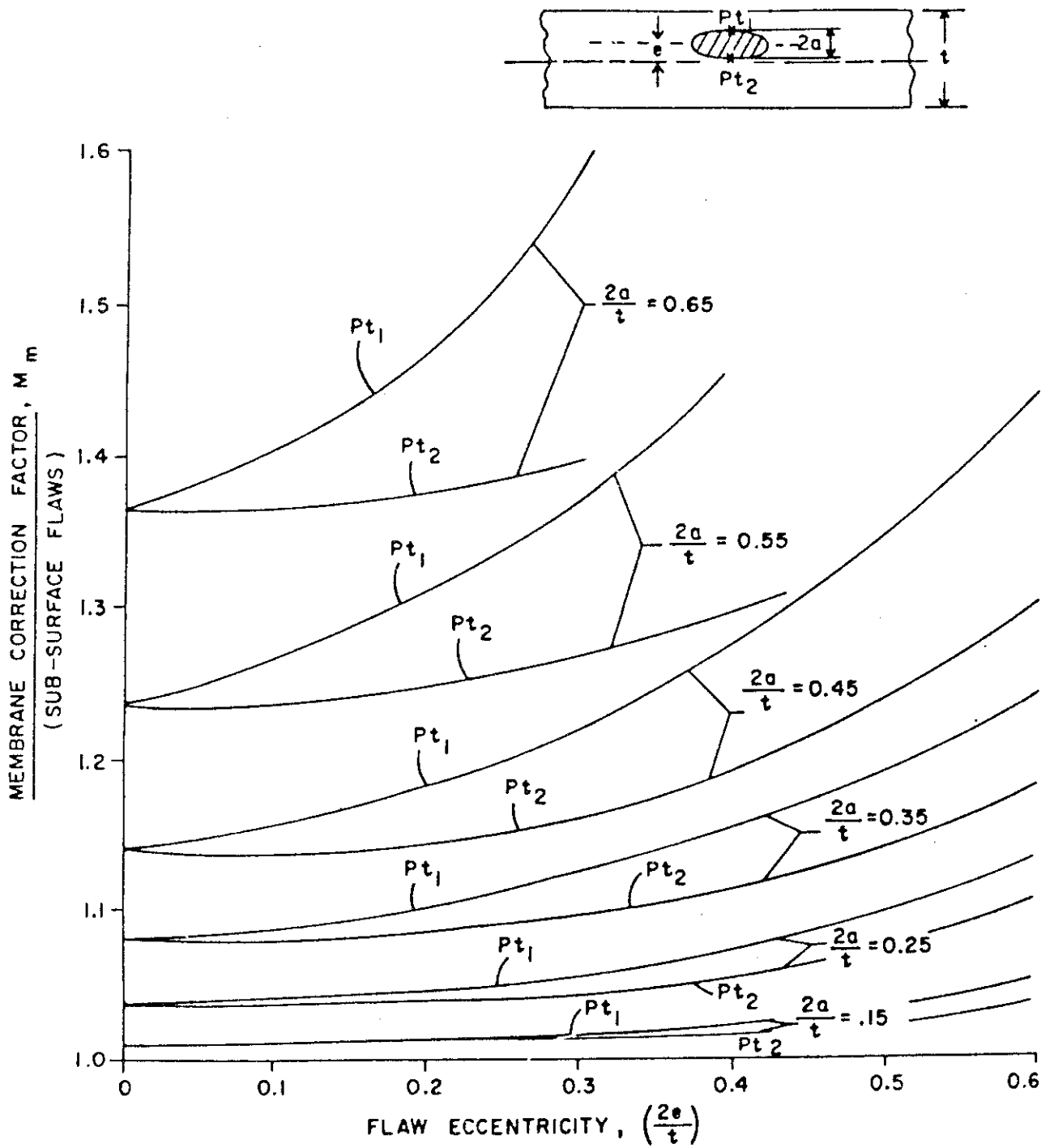


Fig. 13 Membrane Correction Factor for Sub-Surface Flaws

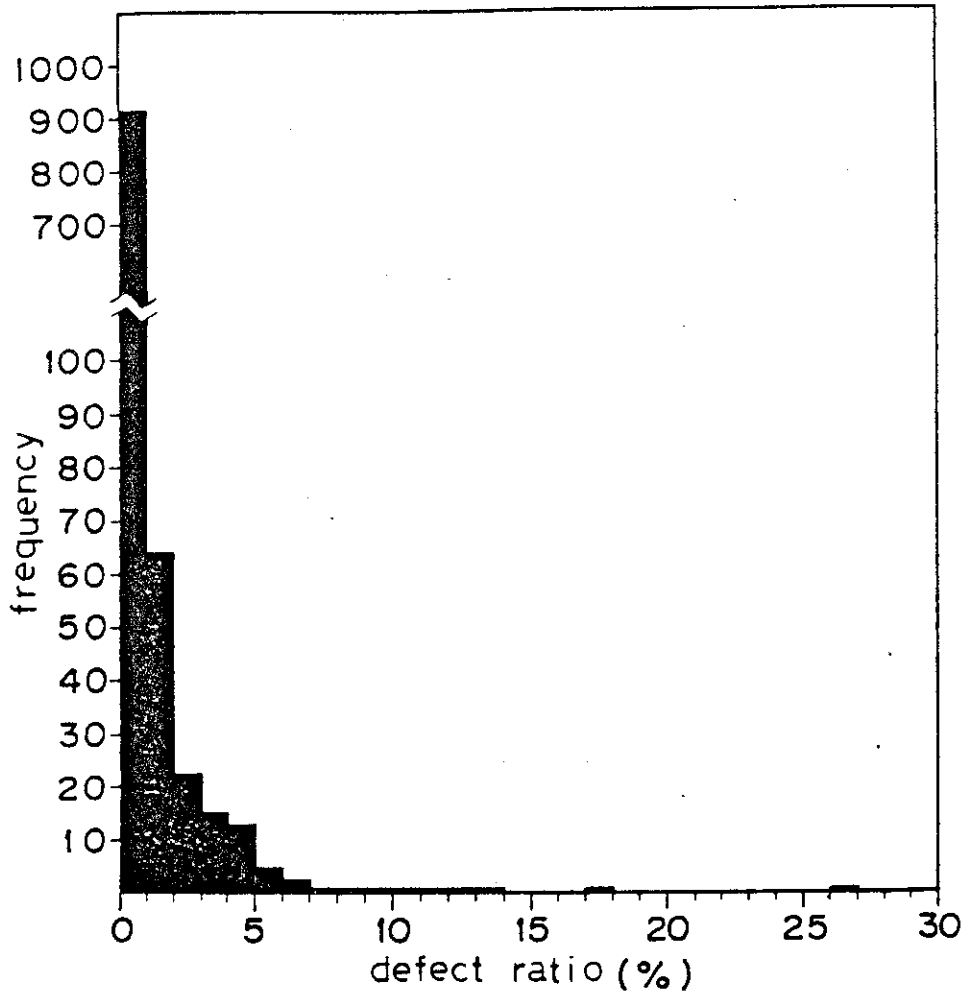
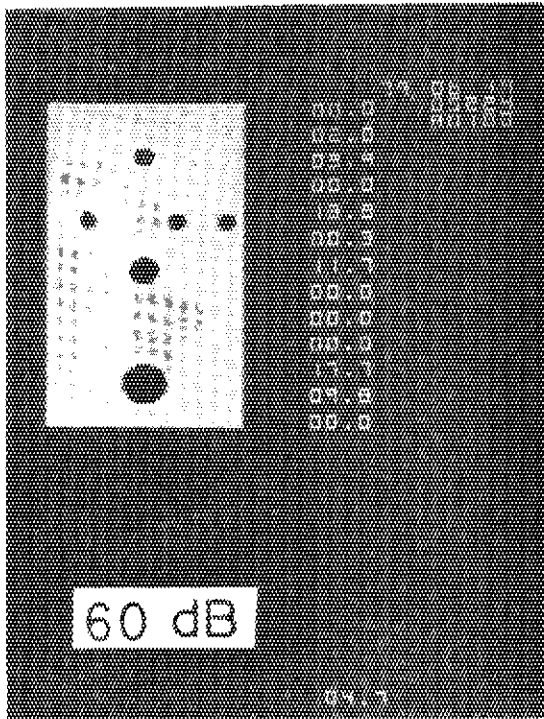
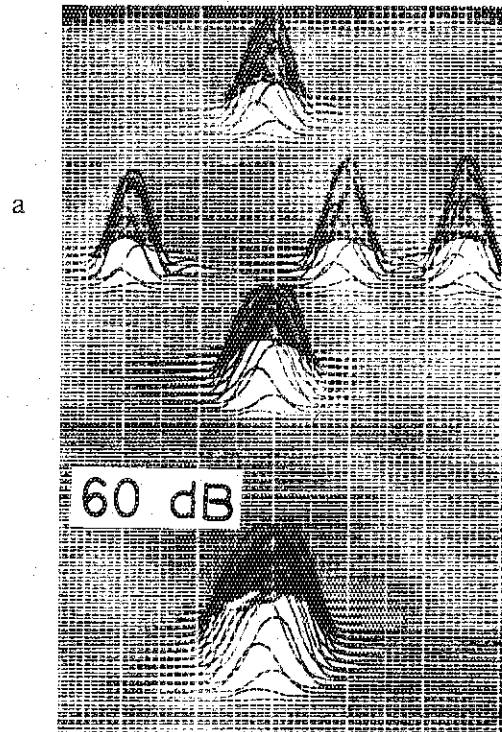


Fig. 14 Ultrasonic Inspected Result



C scope figure



A scope scanning graph

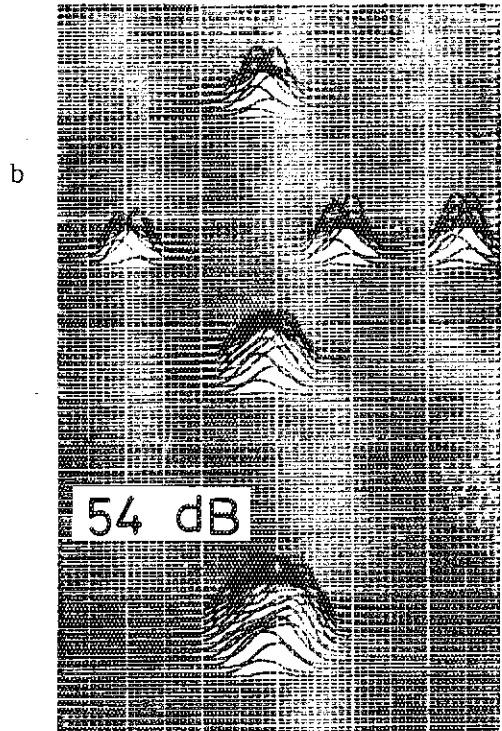
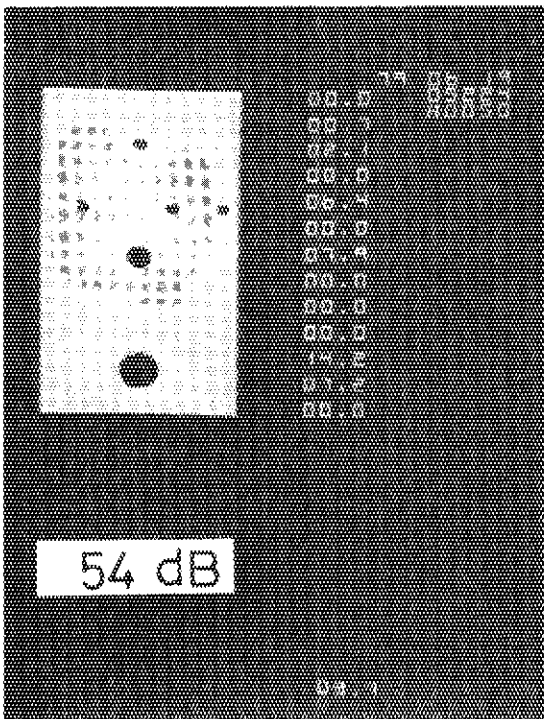


Photo. 3 Comparison between C Scope Figure and A Scope Scanning Graph (at 60dB and 54dB)

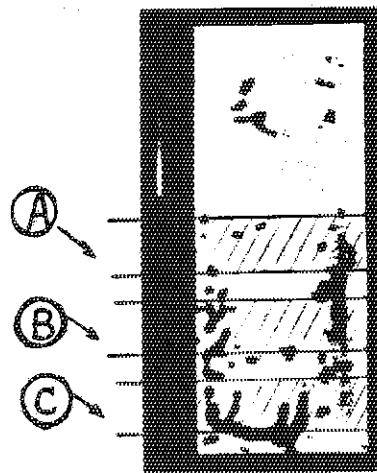
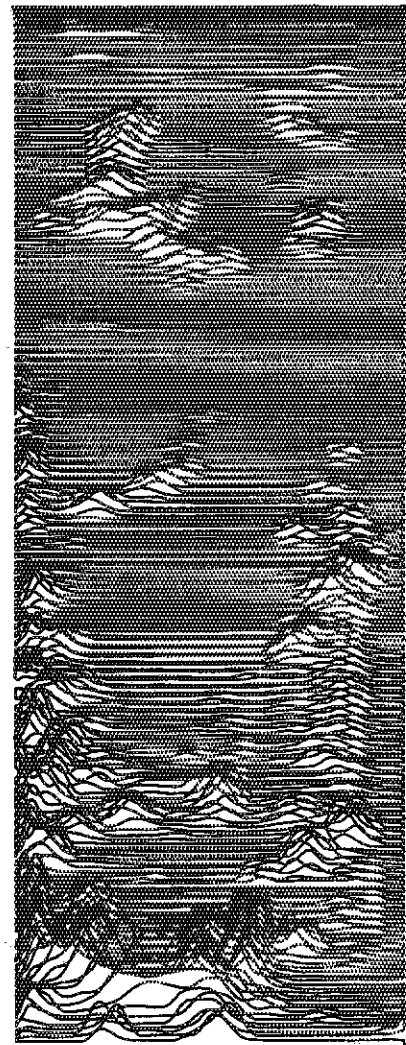
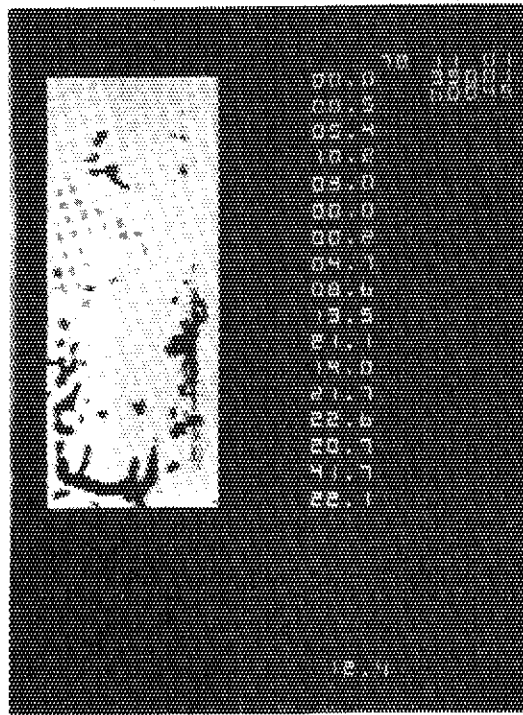


Photo. 4 Ultrasonic Inspected Results of Tensile Test Sample

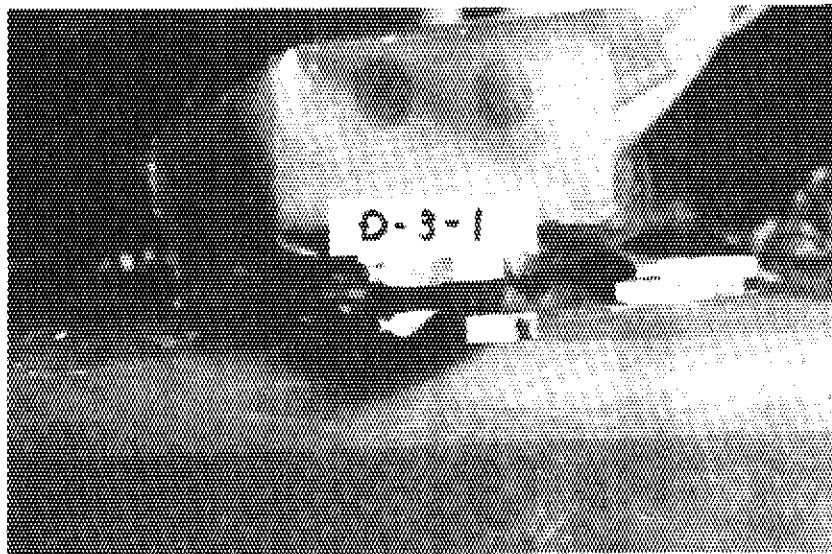
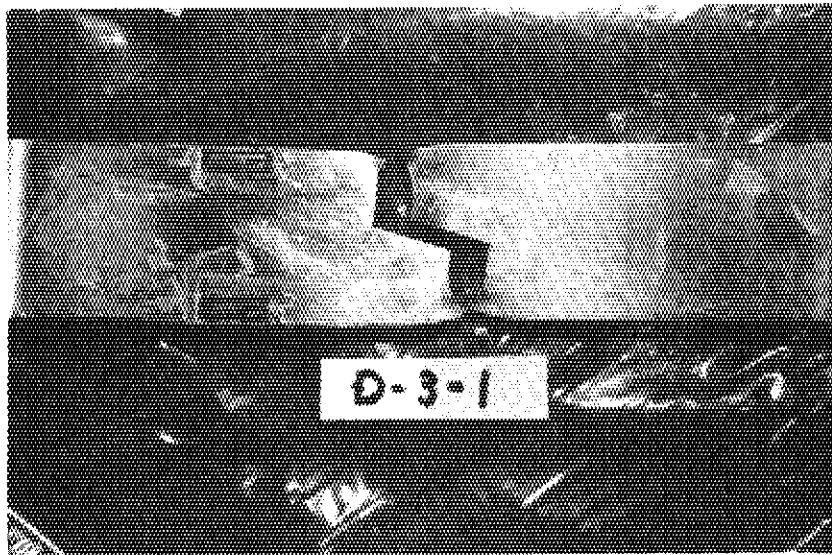
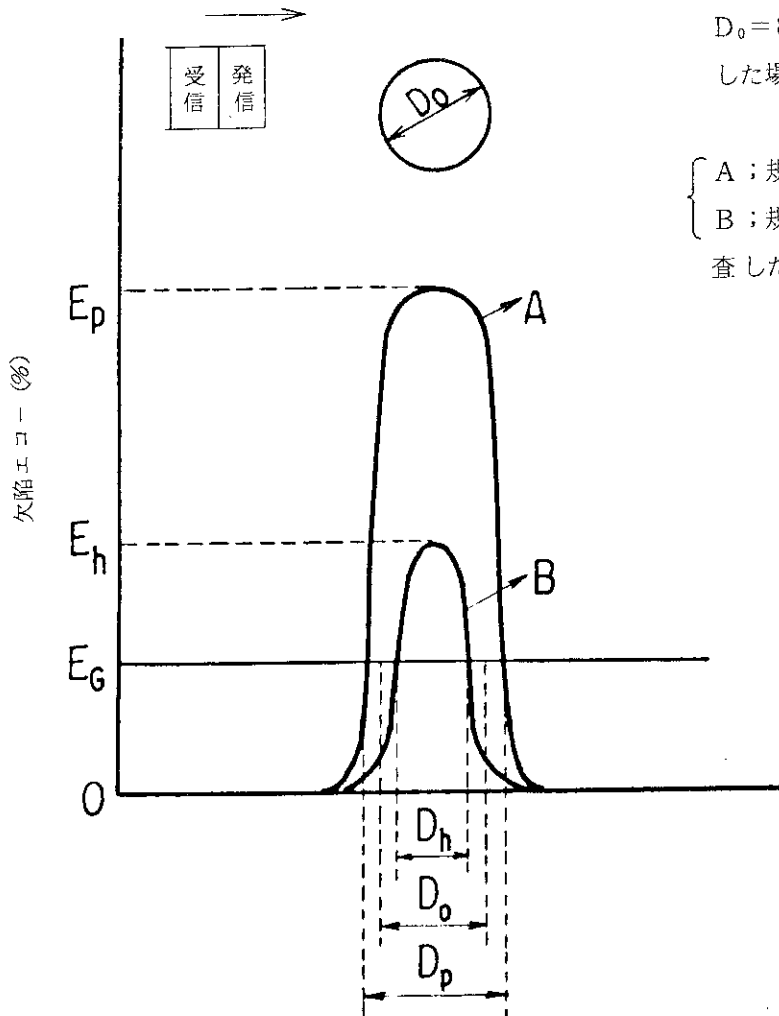


Photo. 5 Fracture by Fatigue Crack Growth

Appendix A

直径 D_0 の欠陥の真上を探触子が通過したときの、欠陥エコーを下図に示す。



$D_0 = 8 \text{ mm } \phi$ で $E_p = 100\%$ と標準化した場合、 $E_G = 25\%$ と定める。

{ A ; 規定探傷感度にも走査した場合
 B ; 規定探傷感度より 6 dB 下げて走査した場合この場合 $E_h = \frac{E_p}{2}$

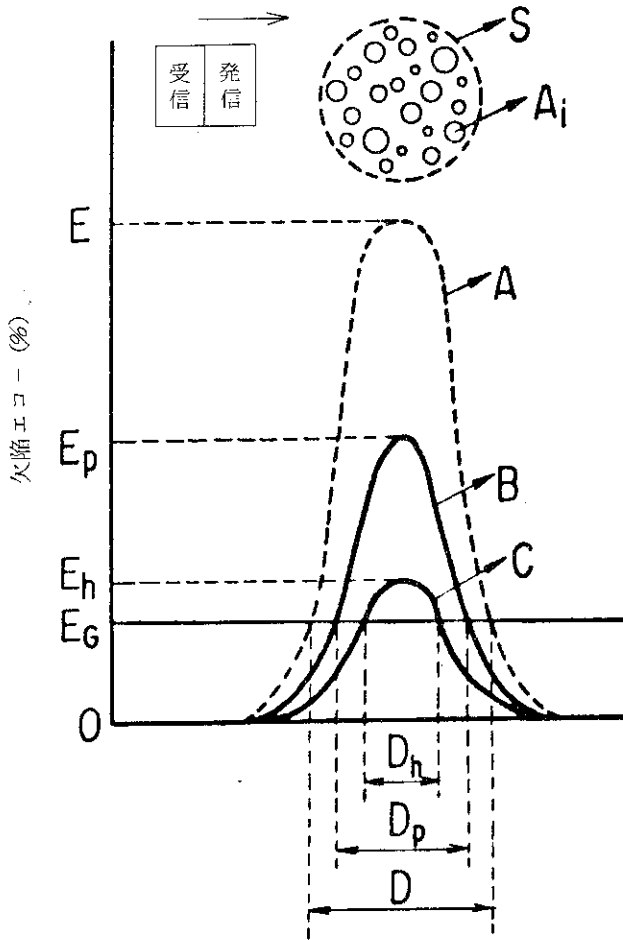
D_0 , D_h および D_p の間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{D_p^2}{D_0^2} \approx 1.3$$

$$\frac{D_h^2}{D_0^2} \approx 0.8 \sim 0.9$$

Appendix B

面積 S (探触子発信部面積の数倍を越えない程度)の任意領域に各々、面積 $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$ を有する n 個の欠陥の存在を想定する。 s_i ($i=1, \dots, n$) は単独としては検出限界以下でもよい。



左図について

$$S_1 = \sum_i^n s_i$$

A ; 面積 S を有する単独欠陥を規定感度にて走査した場合

B ; 上記想定欠陥を規定感度にて走査した場合

C ; 上記想定欠陥を規定感度にて走査した場合

$$\frac{\pi}{4} D^2 \geq 2S$$

$$E_h = \frac{E_p}{2}$$

$$\frac{\pi}{4} D_p^2 > S_1$$

$$\frac{\pi}{4} D_h^2 > \text{Max}(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n)$$