

# 原子炉容器モデル熱過渡強度試験

## 第7報 超音波探傷及びA Eによる探傷

1986年8月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 原子炉容器モデル熱過渡強度試験

## 第7報 超音波探傷及びAEによる探傷

渡士克己\* 金沢誠一\* 石崎公人\*  
梅田寿雄\* 中西征二\*\* 今津 彰\*

## 要 旨

本報告書は構造物強度確性試験施設(TTS)で実施した原子炉容器モデル熱過渡強度試験の予備検討, 供試体の設計・製作, 試験からき裂の解析・評価に到る12冊の報告書の中で, 熱過渡強度試験において供試体における試験途中のき裂の有無を検査する手段として用いた超音波探傷(UT)とアコースティック・エミッション(AE)計測結果について述べたものである。熱過渡強度試験は上記モデルに繰返しの熱過渡荷重を負荷して破損データを得ることによって, 「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」の安全裕度を実証する目的で実施した試験である。UT及びAEで得られた主要な結果を下に示す。

- (1) 供試体中に200℃のナトリウムが流動している状態で板厚25mmの部分及び40mmの部分のSUS304母材と溶接部を超音波探傷した結果, 欠陥指示が認められた。供試体を解体したところ, 欠陥指示に対応した場所にき裂の存在を確認し, 高温超音波探傷が溶接部を含む構造物のき裂の検査に有効であることがわかった。
- (2) 1002サイクルの熱過渡試験中, 連続してAEをモニターした結果, ナトリウムの流動や混合, 構造物の塑性変形とは異なるイベント数及びリングダウンカウント数(どちらもAE信号の一種)の明らかな変化率の増加を700サイクル近傍以後で観察した。AEは構造物におけるき裂の発生繰返し数及び進展速度を計測できる可能性の高いことがわかった。

---

\* 大洗工学センター構造工学室

\*\* 現在, " プラント工学室

Aug. 1986

Thermal Transient Strength Test of Reactor Vessel Model

Vol. 7 Ultrasonic Testing and Acoustic Emission Monitoring

K. Watashi\*, S. Kanazawa\*,  
K. Ishizaki\*, H. Umeda\*,  
S. Nakanishi\*\* and A. Imazu\*

Abstract

This report is one of 12 volumes describing the testing and analytical results associated with thermal transient strength test of reactor vessel model. The objective of the test is to validate the creep-fatigue damage evaluation method described in 'MONJU Design Guide'.

The contents of this report are the results of ultrasonic testing (UT) and acoustic emission monitoring (AE) during thermal transient cycles for crack detection. The main results are as follows;

- (1) The base metal and the welding joint of 25mm thick and 40mm thick portions were examined by UT. During UT period, sodium at 200°C was flowing in the model. The UT was effective and showed many defect indications. After that, the testing model was cut into some pieces, then we confirmed cracking at every UT indications.
- (2) The results of continuous AE monitoring during thermal transient of 1002 cycles showed that the increasing rates of the event number and ring down count number clearly changed at about 700 cycles.

---

\* Structural Engineering Section, OEC, PNC.

\*\* Presently, Plant Engineering Office, OEC, PNC.



## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 熱過渡試験方法 .....	3
2.1 試験条件 .....	3
2.2 試験経過 .....	6
3. 高温超音波探傷試験 .....	7
3.1 検査対象 .....	7
3.2 使用機器 .....	7
3.3 検出感度試験 .....	8
3.4 超音波探傷結果 .....	10
3.5 超音波探傷結果と亀裂観察の比較 .....	11
3.6 スポット溶接の影響 .....	11
3.7 まとめ .....	11
4. 室温超音波探傷試験 .....	41
4.1 検査対象 .....	41
4.2 使用対象 .....	41
4.3 超音波探傷結果 .....	41
4.4 まとめ .....	42
5. A E .....	46
5.1 A E 計測装置および計測方法 .....	46
5.2 A E計測結果 .....	48
5.3 まとめ .....	51
6. 結 論 .....	70
謝 辞 .....	71
参 考 文 献 .....	72
付 録 .....	73

## List of Figures

- Fig. 1 Position of this Report in this Study
- Fig. 2.1 Perspective View of the Model
- Fig. 2.2 Temperature Change of Flow-in Sodium
- Fig. 2.3 Temperature History at Inner Surface
- Fig. 3.1 Area of Ultrasonic Examination
- Fig. 3.2 Wave probe for Thin Portion
- Fig. 3.3 Wave probe for Thick portion
- Fig. 3.4 DAC Character of Wave probe for Thin portion
- Fig. 3.5 DAC Character of Wave probe for Thick portion
- Fig. 3.6 Flaw Detectability in Wave probe for Thin Wall  
(Translated to 25 mm Thick)
- Fig. 3.7 Flaw Detectability in Wave probe for Thick Wall
- Fig. 3.8 Relation Between Crack Depth and UT Signal Level
- Fig. 3.9 Result Traces of Blok Thickness 25 mm weld Metal and Tapering  
portion
- Fig. 3.10 Flow Detection of Block Thickness 25 mm
- Fig. 3.11 Result Traces of Block Thickness 40 mm weld Metal
- Fig. 3.12 Result Traces of Block Thickness 40 mm
- Fig. 4.1 Area of Ultrasonic Examination
- Fig. 4.2 Test Results of DAC
- Fig. 4.3 Result Traces of weld near Metal③  
(Block Thickness 25 mm)
- Fig. 4.4 Result Traces of weld near Metal② (Block Thickness 40 mm)
- Fig. 4.5 Result Traces of weld near Metal⑤ (Block Thicknes 40 mm)
- Fig. 4.6 Result Traces of weld near Metal④ (Block Thickness 40 mm)
- Fig. 5.1 Block Diagram of A E measuring system
- Fig. 5.2 Example Frequency - Sensitivity characteristics of Type 404 AD Senser
- Fig. 5.3 Input and Output of Level Ditector
- Fig. 5.4 Attachment Band of Wave Guide
- Fig. 5.5 Attachment Tool of Wave Guide

- Fig. 5.6 Lay out of AE Sensor
- Fig. 5.7 Lay out of AE Senser and monitor Region
- Fig. 5.8 Relation between Cumulative AE Event Count and Number of Cycles
- Fig. 5.9 Relation between Cumulative Ringdown count and Number of Cycles
- Fig. 5.10 Relation of AE Event Rate and Number of Cycles
- Fig. 5.11 Relation of Ringdown Rate and Number of Cycles
- Fig. 5.12 Correlation of AE Event Count and Phase ( 320 ~ 329 cycles )
- Fig. 5.13 Correlation of AE Event Count and Phase ( 950 ~ 959 cycles )
- Fig. 5.14 Correlation of Ringdown Count and Phase ( 320 ~ 329 cycles )
- Fig. 5.15 Correlation of Ringdown Count and Phase ( 950 ~ 959 cycles )
- Fig. 5.16 Relation of AE Event Count and Ringdown Count ( 320 ~ 329 cycles )
- Fig. 5.17 Relation of AE Event Count and Ringdown Count ( 950 ~ 959 cycles )
- Fig. 5.18 Source Location
- Fig. 5.19 Source Location
- Fig. 5.20 Distribution of AE Event Count ( Hot shock + Cold Shock )
- Fig. 5.21 Distribution of AE Event Count ( Cold Shock )
- Fig. 5.22 Distribution of AE Event ( Hot Shock )
- Fig. 5.23 Crack Distribution ( Moniter Region I )
- Fig. 5.24 Crack Distribution ( Moniter Region II )
- Fig. 5.25 Comparision of AE Distribution and Crack Distribution

## List of Tables

- Table 2.1 Test Schedule
- Table 3.1 Comparison of Ultrasonic Testing and Crack Distributions
- Table 5.1 Condition of usedmeasuring System
- Table 5.2 Condition of AE measuring

## List of Photograph

- Photo. 3.1 Calibration of DAC by Fatigue Flaw  
(Block Thickness 50 mm : Room Temperature)
- Photo. 3.2 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal  
(Block Thickness 25 mm : 200 °C)
- Photo. 3.3 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal  
(Block Thickness 25 mm : 200 °C)
- Photo. 3.4 Detected Wave Form From Tapering Portion
- Photo. 3.5 CRT Traces of Flaw Detection in Base Metal  
(Block Thickness 25 mm : 200 °C)
- Photo. 3.6 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal (II)  
(Block Thickness 40 mm : 200 °C)
- Photo. 3.7 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal (III)  
(Block Thickness 40 mm : 200 °C)
- Photo. 3.8 CRT Traces of Flaw Detection in Base Metal  
(Block Thickness 40 mm : 200 °C)
- Photo. 3.9 Wave Form of Quasi-Defect of Spot Weld

## 1. ま え が き

本報告書は構造物強度確性試験施設（TTS）で実施した原子炉容器モデル熱過渡強度試験に於いて、試験期間中のき裂の発生進展の計測手段として高温超音波探傷法（UT）とアコースティックエミッション（AE）信号を連続モニタリングする方法とを用いた結果について述べたものである。

高温 UT も AE も材料試験片を用いた研究は種々あるが、実在き裂への適用性研究については試験データが少ないこともあり、あまり行われていないのが現状であり、本研究開発の成果は非常に貴重なものである。

FBR原型炉の原子炉容器に採用予定のカプラントのいない電磁超音波探傷法（EMAT）も本試験で得られたき裂入り厚肉胴を用いて適用性の研究が実施されており、近々高速増殖炉機器開発室から報告書として配布される予定である。

本報告書は UT と AE を取り扱ったものであるが、原子炉容器モデル熱過渡強度試験の一連の報告書の内容は既報・続報を含めて Fig.1 の通りである。これらの報告書の内容をまとめると概略次のようになる。

原子炉容器モデル熱過渡強度試験の一連の報告書は 1) TTS を用い 1985 年に実施した厚肉容器の熱過渡によるクリープ疲労試験の結果（第 3 報）と、2) UT 及び AE 試験結果（第 7 報、本報）3) き裂の観察結果（第 4 報）、4) 伝熱応力解析と高速炉第 1 種機器の高温構造設計方針の評価（第 5 報、第 6 報）並びに 5) き裂の解析と評価結果（第 12 報）についてまとめたものである。又、供試体の設計から健全性評価に到る過程で必要となった作業のうち、まとめる必要があると考えられる成果についても報告書として整理した。これらの中には、6) 実質的なクリープ疲労寿命を予測する手法（これは実証炉以後の FBR 用の設計基準を考える上でベースになると考えられる）（第 2 報）、7) 流体と構造物の相互作用を考慮してワンスルーで応力まで計算できる簡易流動伝熱応力解析コード（PEGASUS）の開発（第 9 報、第 10 報）、8) 非弾性応力解析ベースでの損傷の評価も可能な一連のポストプログラムの開発（第 8 報）が含まれる。



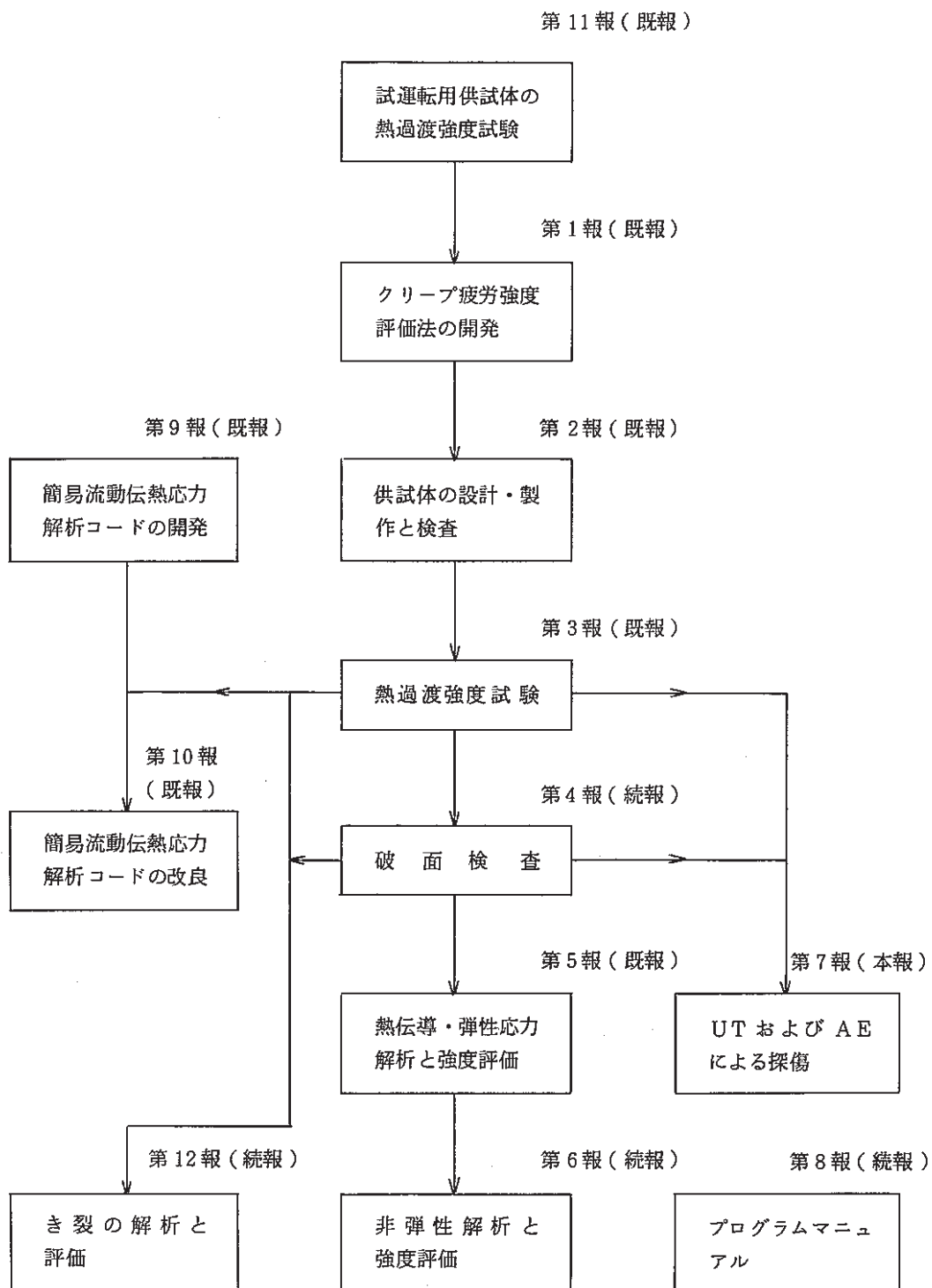


図1 報告書の内容

Fig.1 Position of This Report in This Study

## 2. 熱過渡試験方法

### 2.1 供試体と試験条件

供試体の形状を Fig. 2.1 に示す。供試体は SUS 304 又は SUSF 304 製の肉厚 25 mm, 外径 880 mm, 高さ 2.1 m のまゆ型容器であり, 内部に熱過渡応力緩和用のサーマルライナーを含んでいる。試験対象部位(き裂を発生させる位置)は Fig. 2.1 に示すように, 入口ノズル, 出口ノズル, 計装ノズル, 板厚変化部, 一般胴部, スタッドボルト付け根部, スカート付け根部である。

熱過渡強度試験は, 構造物強度確性試験施設(TTS)を用いてナトリウムにて供試体に熱荷重を負荷することで実施した。ナトリウムは入口ノズルから  $1\text{ m}^3/\text{min}$  の流量で供試体に流入し, 供試体に熱過渡を与えた後出口ノズルから流出する。流入するナトリウムの温度は Fig. 2.2 に示すように,  $40\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$  の変化速度で高温( $600\text{ }^\circ\text{C}$ )から低温( $250\text{ }^\circ\text{C}$ )へ, 低温から高温へと 1 サイクル 2 時間で変化する。流入するナトリウムの温度変化によって供試体の内側には Fig. 2.3 の熱過渡が負荷される。同一の熱過渡を 1002 サイクル供試体に負荷した。

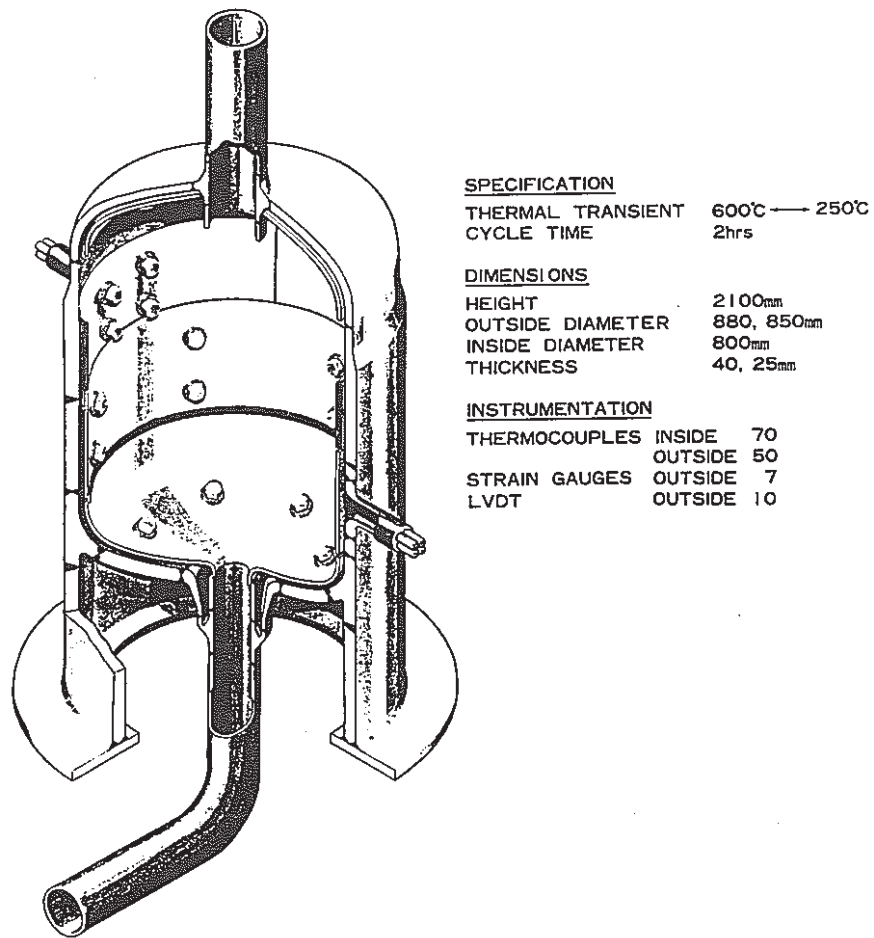


図 2.1 供試体の形状

Fig.2.1 Perspective View of the Model

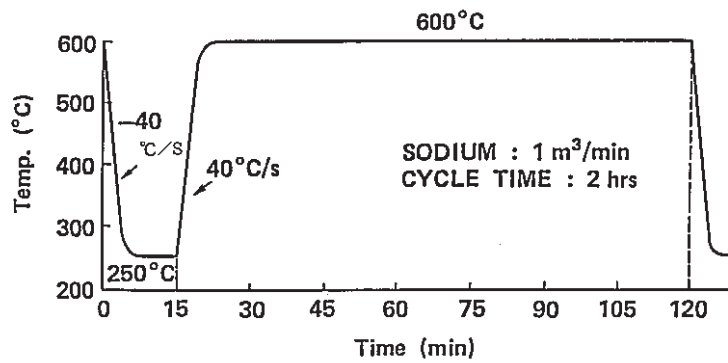


図 2.2 入口ノズル部ナトリウム温度変化

Fig.2.2 Temperature Change of Sodium at Inlet Nozzle

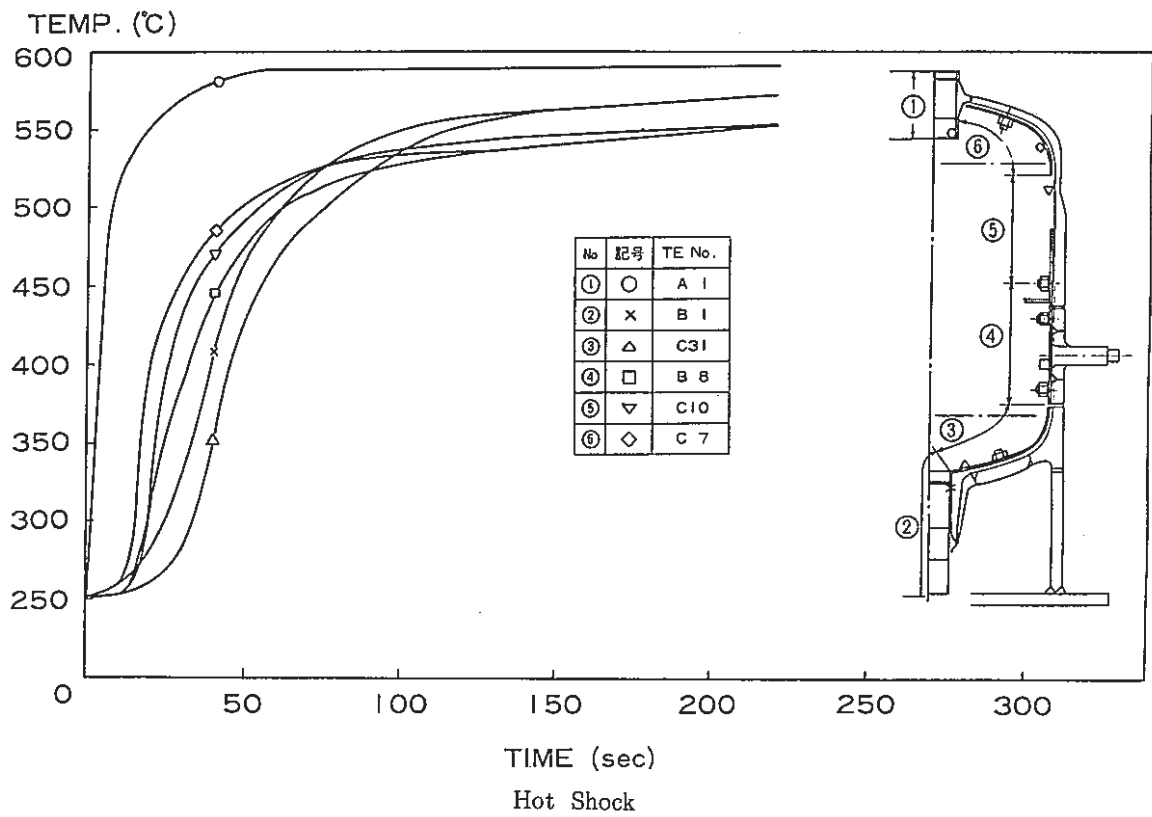
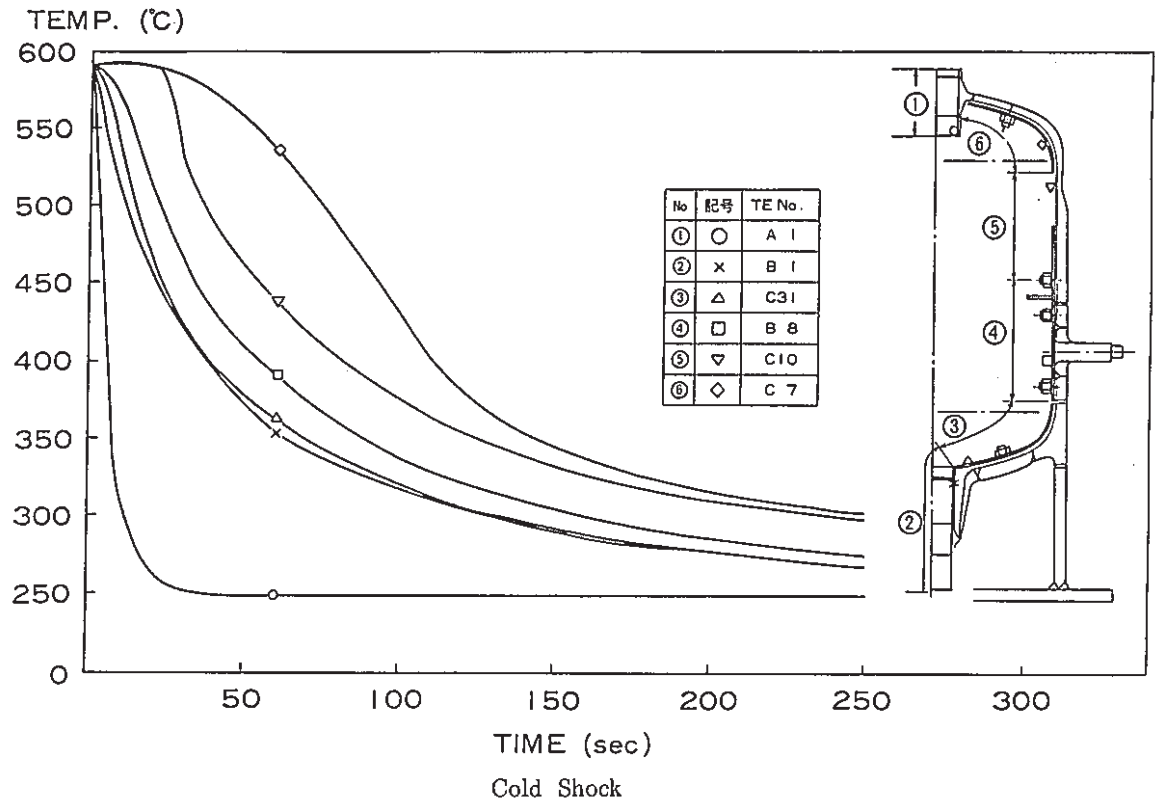


図 2.3 内表面の温度変化

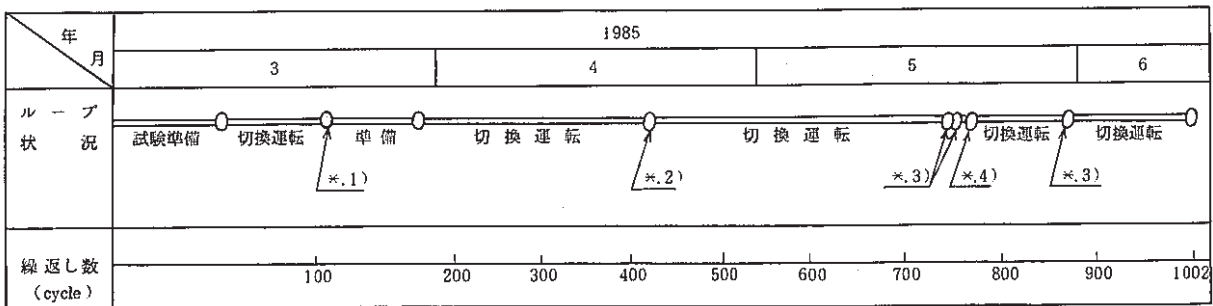
Fig. 2.3 Temperature History at Inner Surface

2.2 試験経過

Table 2.1 に試験経過を示す。試験前準備に約 10 日間、試験期間中ナトリウム空操弁の作動用窒素ガス供給断、ナトリウム空操弁 (EV-101, EV-105) 作動不良、ナトリウム漏洩誤警報等の不具合が生じたが、熱過渡サイクルがほぼ順調にかけられ、予定した繰返し数 1002 サイクルで試験を中断し、低温系のナトリウムを 250℃ から 200℃ に降温して、供試体のパッケージ保温部を取りはずして供試体外表面について超音波探傷を行った。その結果、供試体に欠陥指示が認められたので試験を終了した。

表 2.1 試験経過

Table 2.1 Test Schedule



- \*.1) ナトリウム空操弁作動用窒素ガス配管誤切断.
- \*.2) ナトリウム弁 (EV-101) 異常.
- \*.3) " (EV-105) 異常.
- \*.4) 供試体入口配管ナトリウム漏洩誤警報.



### 3. 高温超音波探傷試験

#### 3.1 検査対象

Fig. 3.1 に超音波探傷試験範囲を示す。保温材取外し後の3ヶ所の溶接線の熱影響部及び、母材部について、円周方向の内面欠陥を主対象に探傷した。対象箇所の検査条件は以下の通りである。

- 材 質：SUS304
- 板 厚：溶接線(I) 25 mm, 溶接線(II), (III) 40 mm
- 被検体温度：約 200 ℃
- 雰囲気：大気
- 被検体内部：流動ナトリウム (1 m<sup>3</sup>/min)

#### 3.2 使用機器

##### 1) 超音波探触子

2種類の探触子を使用した。

##### ① 薄肉部用 (Fig. 3.2 に示す。)

- 探傷周波数 約 2 MHz
- 屈接角 約 45°

##### ② 厚肉部用 (Fig. 3.3 に示す。)

- 探傷周波数 約 2 MHz
- 屈折角 約 45°

##### 2) 超音波探傷器

- メーカ クラウトクレーマ
- 型 名 USIP - 11

##### 3) カプラント

- 型 名 シリコンオイルKF - 54

##### 4) 試験片

以下の3種類の試験片を較正用として使用した。

##### ① 薄肉部用横穴試験片 (平板)

- 材 質 SUS 304
- ドリル穴径 2.4 φmm
- 試験ドリル穴深さ 20, 30, 40 mm

② 厚肉部用横穴試験片(平板)

- 材 質 SUS 304
- ドリル穴径 3.2  $\phi$  mm
- 試験ドリル穴深さ 40 mm

③ スリット入り試験片(供試体と同一素材から製作)

- 材 質 SUS 304
- 寸 法 板厚 40 mm, 外径 880 mm<sup>OD</sup>
- スリット位置, 方向 内面円周方向
- スリット深さ 1, 2, 3, 5 mm
- スリット幅 1, 2 mm

5) その他

探傷器 CRT 記録用にポラロイドカメラを使用した。

### 3.3 検出感度試験

実供試体試験に先立ち、探傷結果の評価基準を得ることを主目的に検出感度の試験を実施した。実供試体試験時には、高温状態での感度調整ができないため、①常温と高温との感度差、②高温での欠陥信号レベルの2項目を事前に試験し、データをとった。

#### 3.3.1 試験項目及び条件

1) 常温と高温との感度差試験

薄肉部用及び厚肉部用探触子について、横穴試験片で常温と高温との感度差等を試験した。試験条件は以下の通りである。

- 温度条件 室温及び 200  $^{\circ}$ C (高温探傷は恒温器にて探触子、試験片を昇温し、実施した。)
- 探触子及び試験片穴
  - 薄肉用探触子 2.4  $\phi$  mm 横穴
  - 厚肉用探触子 3.2  $\phi$  mm 横穴
- カプラント シリコンオイル KF 54 塗布
- 探傷法 手探傷

2) 高温での欠陥信号レベル

薄肉部用及び厚肉部用探触子について、高温状態でスリット欠陥の検出性を試験した。

- 温度条件 200  $^{\circ}$ C  $\pm$  5  $^{\circ}$ C
- 探触子 薄肉用及び厚肉用
- 試験片 スリット入り試験片, 円周方向スリット深さ, 1, 2, 3, 5 mm

その他の条件は 1) 項の試験と同様である。

### 3.3.2 検出感度試験結果

#### 1) 探触子の常温と高温との感度差測定結果

薄肉用探触子で常温及び高温（200℃）の雰囲気条件で、深さが異なるドリル穴（2.4 mm 径）を測定した結果を Fig. 3.4 に示す。また、同様に厚肉用探触子でドリル穴（3.2 mm 径）を測定した結果を Fig. 3.5 に示した。DAC（Distance Amplitude Compensation：距離振幅補償）測定結果より常温と高温との検出感度差は以下の通りであった。

##### ○薄肉用探触子

深さ 25 mm の位置で常温に比べ高温は 17 dB 低下した。また、高温時の 100% DAC レベル（CRT 40%）は 38 dB（探傷器ゲイン）であった。

#### 2) 高温での母材スリット欠陥検出結果

板厚 40 mm の母材部内表面円周方向に深さ 1, 2, 3, 5 mm の各スリット欠陥を設けた試験片を、薄肉用及び厚肉用の各探触子で、高温（200℃）雰囲気条件で探傷して欠陥検出性を調べた結果を Fig. 3.6 及び Fig. 3.7 に示した。

薄肉用探触子（対象板厚 25 mm）で板厚 40 mm の内面スリット欠陥を探傷したが、実機探傷時の検査対象とする板厚 25 mm で探傷した時の欠陥検出レベルに換算し Fig. 3.6 に示した。また、厚肉用探触子でスリット欠陥を探傷した結果を Fig. 3.7 に実線○印で示した。

#### 3) 疲労欠陥の欠陥検出性

板厚 50 mm の供試体で自然欠陥（疲労欠陥、深さ 6.5 mm）がある試験片を室温条件で探傷した。Photo 3.1 に疲労欠陥探傷波形例を示す。探傷結果より疲労欠陥検出レベルの平均値を求め、その値を疲労欠陥深さ 6.5 mm とした。これらの値より、高温時での板厚 40 mm の疲労欠陥深さと、欠陥信号レベルの関係を、DAC 特性（Fig. 3.5）及びスリット欠陥検出結果（Fig. 3.7 の実線）より換算して求めた。その結果を Fig. 3.7 に破線で示した。

#### 4) 欠陥深さの推定

薄肉用及び厚肉用探触子で探傷して得られた信号レベルに対する欠陥推定深さの関係を Fig. 3.8 に示した。Fig. 3.8 (1) は薄肉用探触子で探傷した場合で、横軸の信号レベルは DAC（%）で示している。また、Fig. 3.8 (2) は厚肉用探触子で探傷した場合である。通常、欠陥信号レベルと欠陥深さの間には、必ずしも明確な相関関係はないが、欠陥深さ参考値を得るためにこれらの図を使用した。

### 3.4 超音波探傷結果

#### 3.4.1 板厚 25 mm 部 (薄肉用探触子による試験)

Fig. 3.1 の溶接 (I) を含む斜線部について下記のように探傷し、データ評価を行った。

##### 1) 溶接部 (I) 及びシンニング部

溶接部及びシンニング部近傍に探触子を軸方向に置き、探触子を軸方向に走査させて、ピークのエコーレベルを記録した。溶接部については溶接線の上下 2 方向から円周方向に約 10 mm ピッチで探触子を移動させ、探傷した。Photo 3.2 ~ Photo 3.4 に探傷波形を示す。Fig. 3.9 はこれらを整理した結果である。縦軸は信号レベル (DAC 換算値) を示す。又、図の右にスリット深さ換算値 (Fig. 3.8 (1) による) を示した。この結果、溶接部の一部に、スリット換算深さ 1 mm 相当、シンニング部にスリット換算深さ 0.5 ~ 1.0 mm 相当のエコーが認められた。

##### 2) 母材部

Fig. 3.1 のパッケージ保温 (2) の全域にわたり、探触子を主に円周方向又は軸方向に向け探傷し、比較的高いエコーの部位を記録した。Photo 3.5 に探傷波形を示す。これら波形のエコー源位置、超音波入射方向、信号レベル (DAC %) を Fig. 3.10 に示す。母材部においては、溶接部やシンニング部ほど高いエコーは認められず、高い場合でも DAC 約 140 % (スリット換算値 0.5 mm 以下) 程度であった。

#### 3.4.2 板厚 40 mm 部 (厚肉用探触子による試験)

Fig. 3.1 の溶接線 (II) (III) を含む斜線部について以下のように探傷し、データ評価を行った。

##### 1) 溶接部 (II) (III)

板厚 25 mm 部と同様に、溶接線の上下 2 方向から熱影響部を、円周方向約 10 mm ピッチで軸方向に超音波を入射して探傷し、ピークエコーを記録した。Photo 3.6 ~ 3.7 に探傷波形を示す。Fig. 3.11 はこれらを整理した結果である。縦軸は信号レベル (DAC %) に加え、グラフ右側にスリット及び、疲労欠陥高さ換算値 (Fig. 3.8 (2) による) を示した。この結果、溶接熱影響部で検出されたエコーレベルの最も高いのは、下部溶接線の上部側より探傷した場合で、スリット換算で約 2 mm (疲労欠陥換算で約 3.6 mm) と推定された。

##### 2) 母材部

板厚 25 mm 部と同様の探傷を行った。Photo 3.8 に探傷波形を、Fig. 3.12 にエコー源位置、超音波入射方向、信号レベル (DAC %) を示す。母材部での最も高い検出レベルは、スリット換算で約 2.2 mm (疲労欠陥深さ換算で約 4.2 mm) であった。

### 3.5 超音波探傷結果と亀裂観察結果の比較

Table 3.1 に超音波探傷結果と亀裂観察結果の比較を示す。超音波探傷試験は供試体の135°方向の結果を示す。亀裂観察の結果は供試体の80°、160°方向の亀裂観察結果を示す。この結果、亀裂観察結果の方が約10倍程度大きいことがわかる。しかし、下部胴・コニカル胴では亀裂観察結果の方が約 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{3}$ 程度小さい。

### 3.6 スポット溶接の影響

探傷した供試体内表面には多数の熱電対が取付けられている。熱電対の配線はSUSの箔を介してスポット溶接で固定されており、その影響が探傷時の検出レベルにどの程度の影響を与えるかを実験で検討した。

試験片(SUS 304)板厚20 mmと40 mmを用い、試験片の片面にSUSの箔をスポット溶接した。スポット溶接は箔の長さ(円周方向)10 mmの間に、それぞれ5、10、15、20点行い、この各試験片を常温で探傷した。その探傷波形をPhoto 3.9に示す。この結果より、スポット溶接部からの検出レベルは供試体探傷時のレベル換算にすると、薄肉用探触子で約65.5 dB、厚肉用探触子では約54 dBである。この値をDAC換算でFig. 3.9及びFig. 3.11の探傷結果に点線で示した。この結果より、スポット溶接部からの検出レベルは、ノイズレベルに近い値であり、欠陥検出するうえで特に問題となる検出レベルではなかった。

### 3.7 まとめ

炉容器供試体の板厚25 mm及び40 mmの部位について探傷を行った。この結果、板厚25 mm部では、スリット換算深さ約1 mm相当、板厚40 mm部ではスリット換算深さ約2 mm相当のエコーが認められた。これらレベルは常温ではあるがスポット溶接の影響を調べたデータPhoto 3.9からすると、スポット溶接のエコーレベルよりもかなり大きな値であり、有意な欠陥指示と判断された。



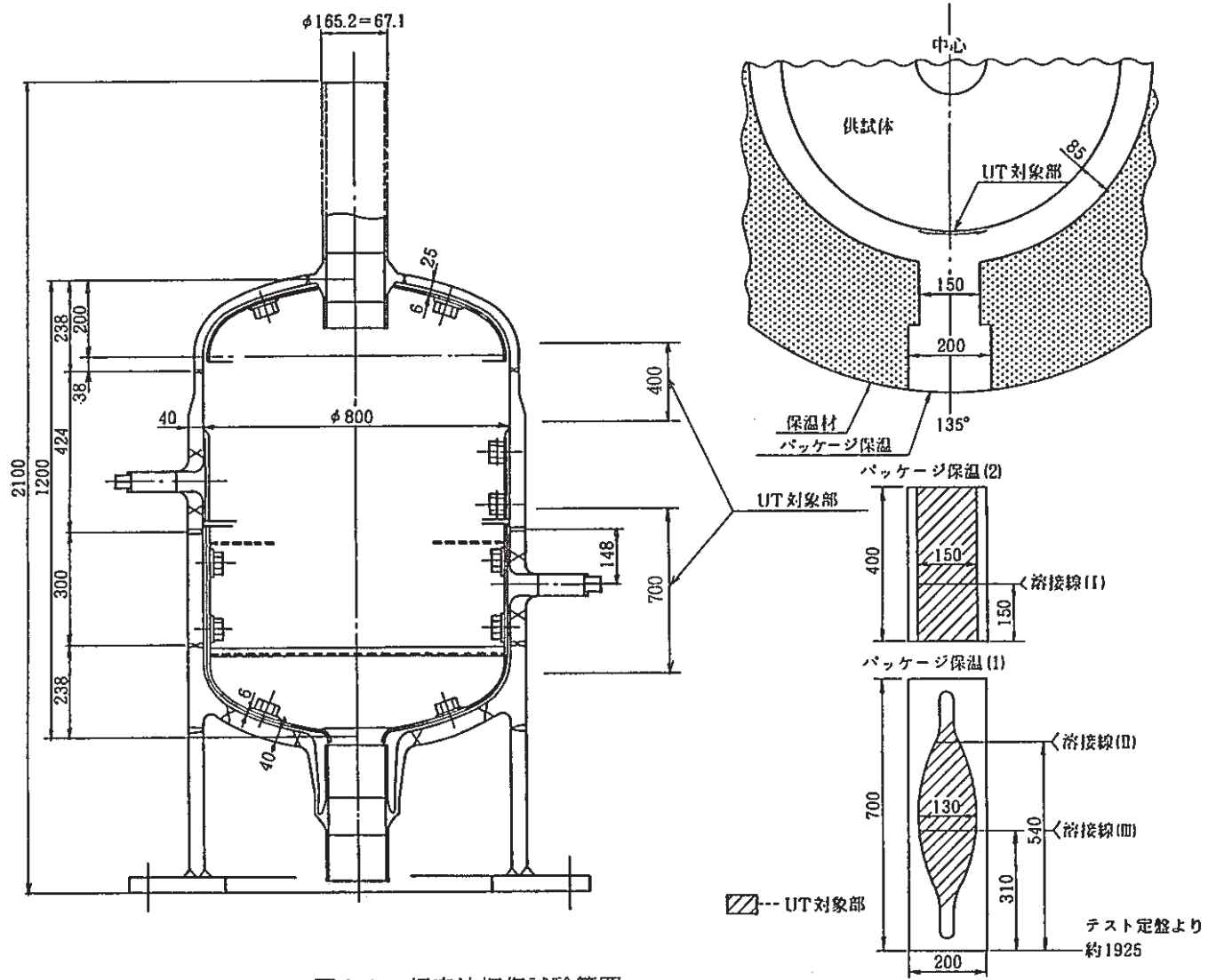


図 3.1 超音波探傷試験範囲

Fig.3.1 Area of Ultrasonic Examination

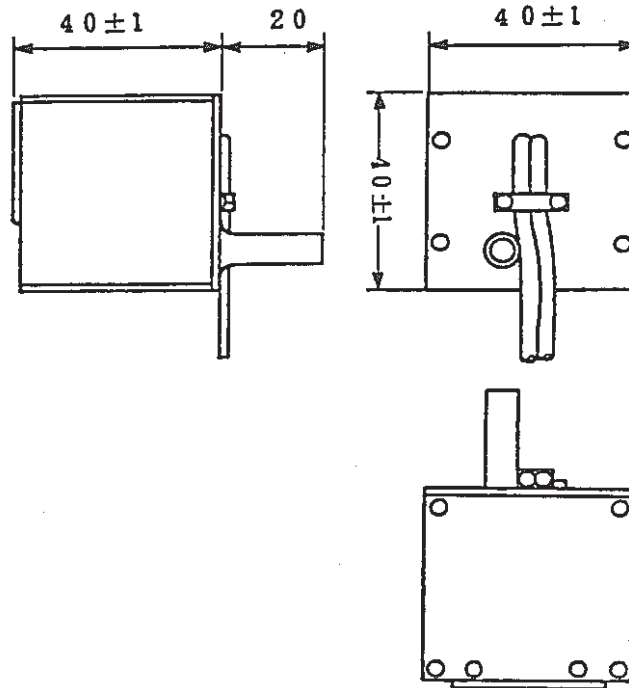


图 3.2 薄肉部用探触子

Fig.3.2 Wave Probe for Thin Portion

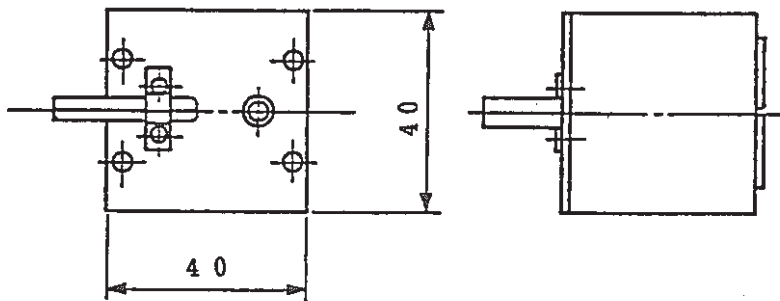


图 3.3 厚肉部用探触子

Fig.3.3 Wave Probe for Thick Portion

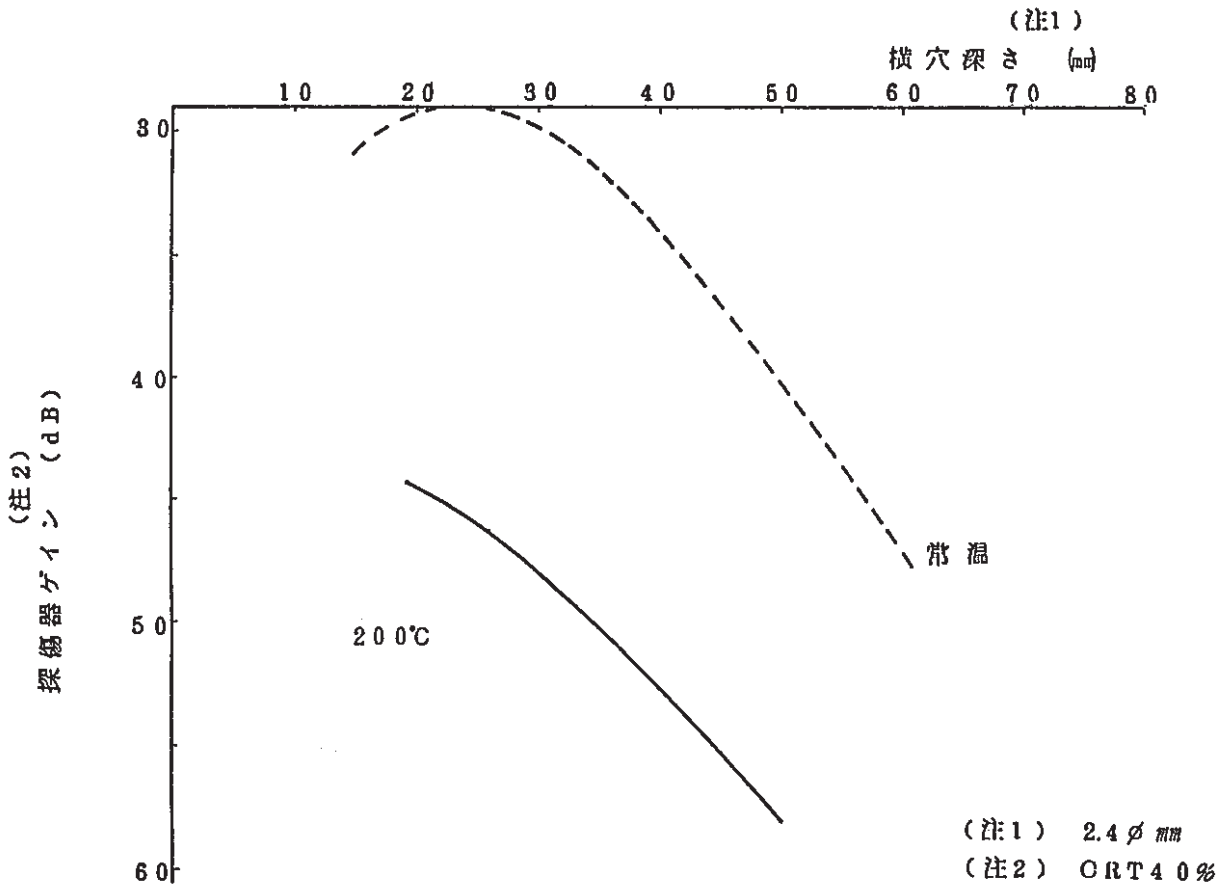


図3.4 薄肉用探触子DAC特性

Fig.3.4 DAC Character of Wave Probe for Thin Portion

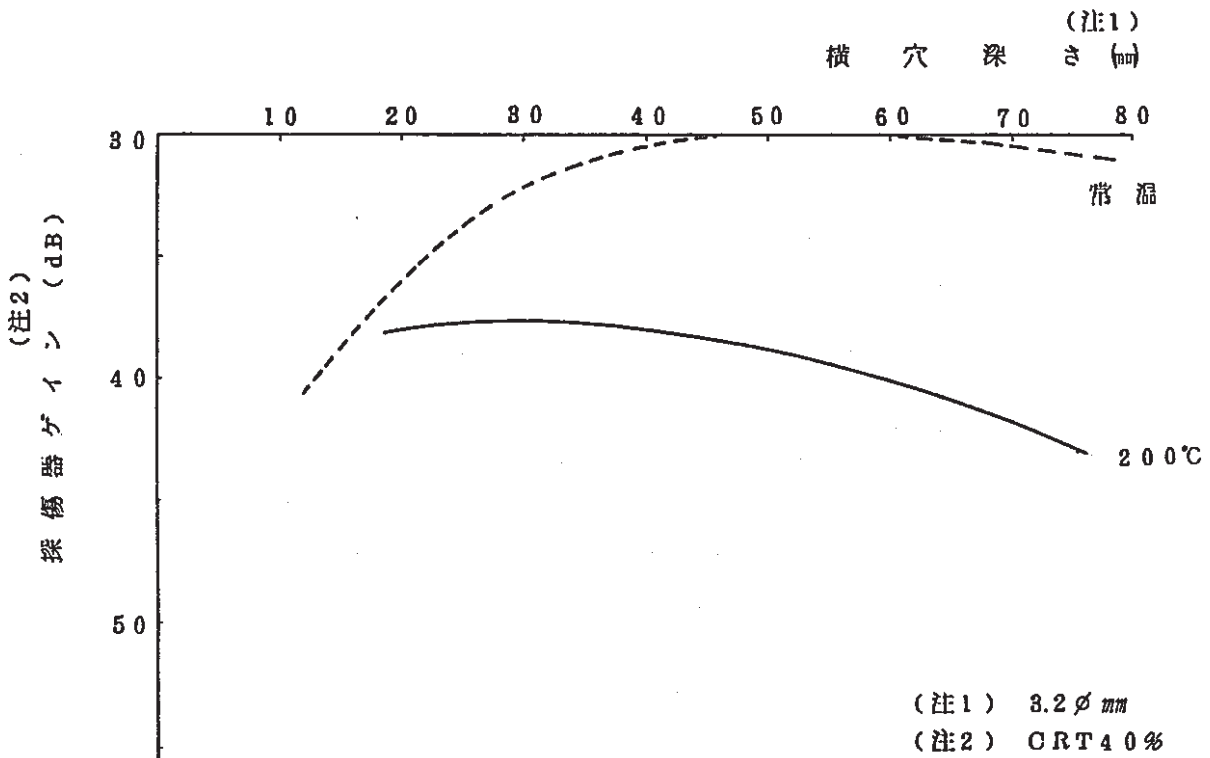


図3.5 厚肉用探触子DAC特性

Fig.3.5 DAC Character of Wave Probe for Thick Portion

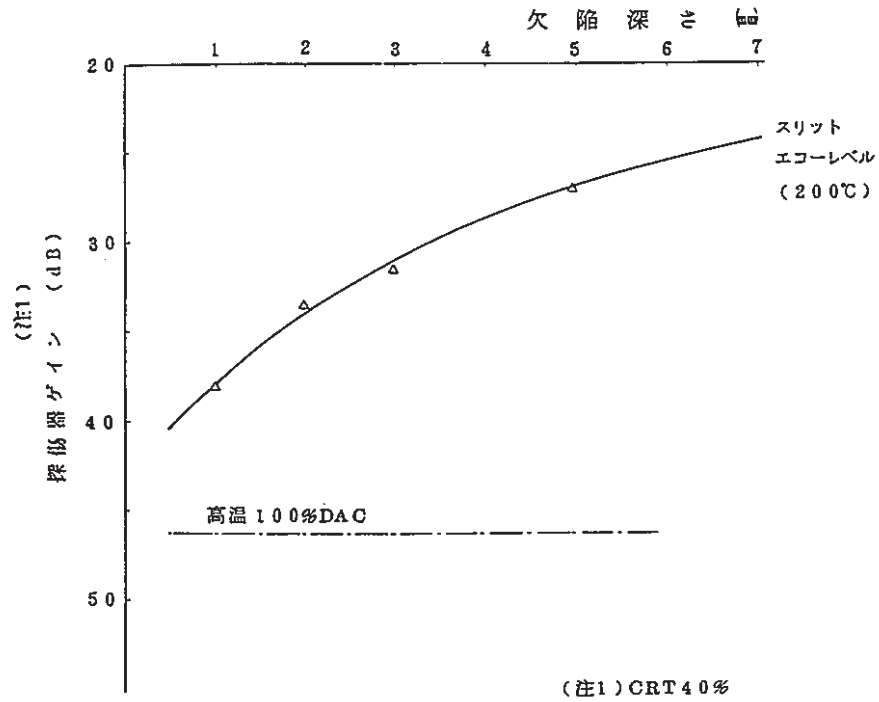


図 3.6 薄肉用探触子欠陥検出性 (板厚 25 mm 換算)

Fig. 3.6 Flaw Detectability in Wave Probe for Thin Wall (Translated to 25 mm Thick)

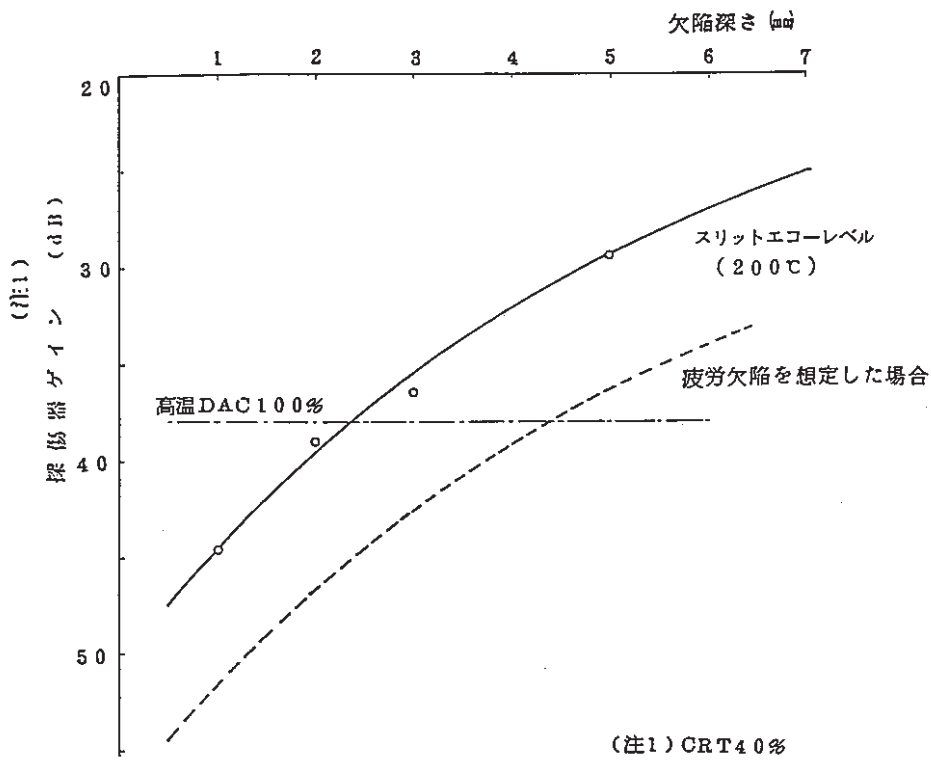


図 3.7 厚肉用探触子欠陥検出性

Fig. 3.7 Flaw Detectability in Wave Probe for Thick Wall

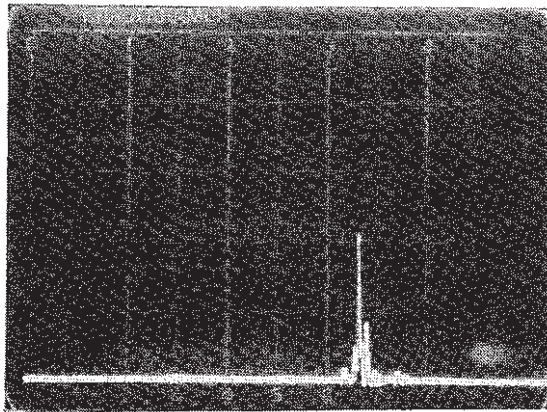
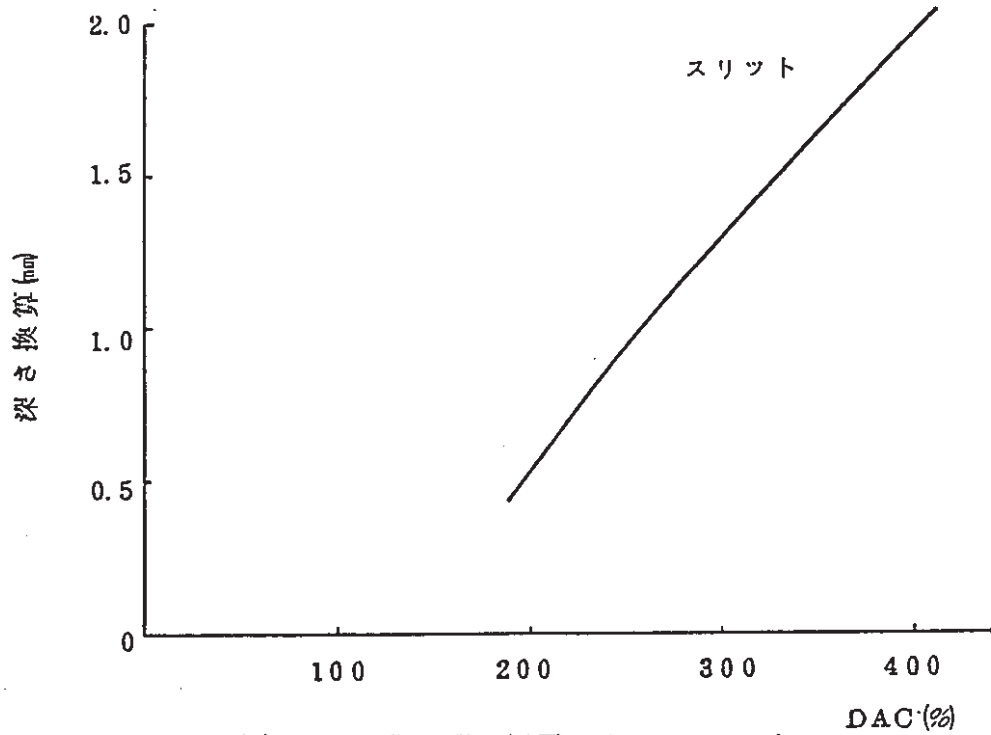


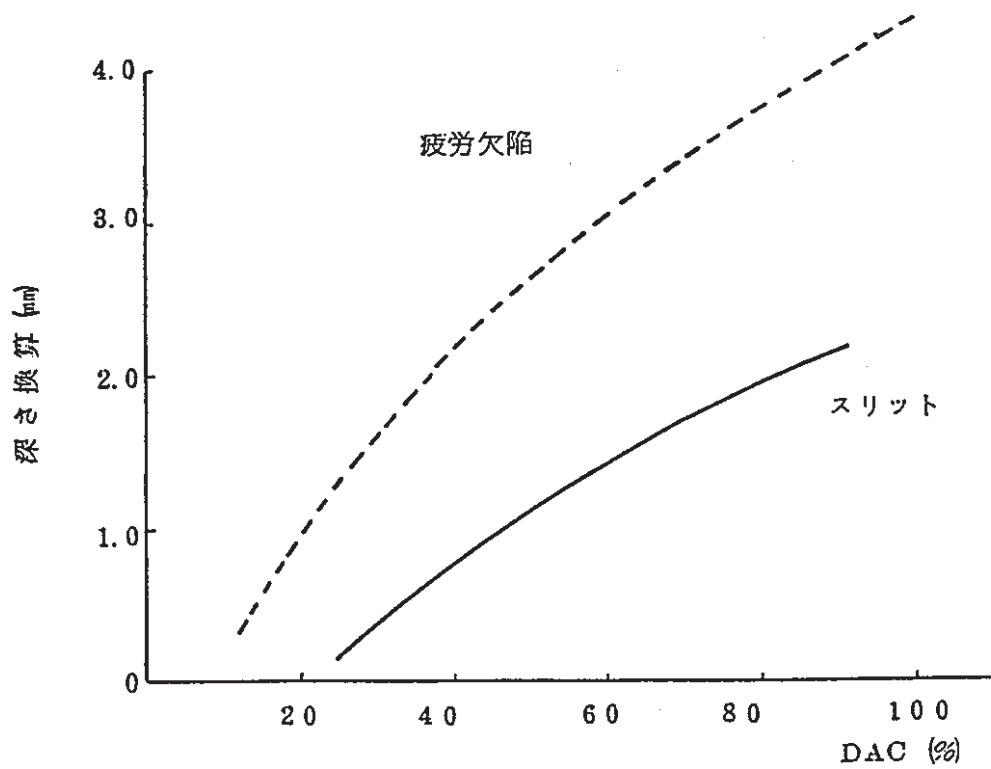
写真 3.1 疲労欠陥探傷波形例 (板厚 50 mm : 室温)

Photo 3.1 Calibration of DAC by Fatigue Flaw  
(Block Thickness 50 mm : Room Temperature)





(1) 薄肉用探触子 (板厚 2.5 mm について)



(2) 厚肉用探触子 (板厚 4.0 mm について)

図 3.8 信号レベルと欠陥深さ換算 (200 °C)

Fig. 3.8 Relation Between Crack Depth and UT Signal Level

探触子 : 横波 45° (200℃)  
 : 薄肉用センサー  
 探傷方向 : 溶接部上側より入射  
 探傷感度 : 46 dB  
 (CRT 40% が DAC 100% 相当)  
 但し 30mm 位置を除く。  
 横軸 : 高温にて横波 100mm  
 フルスケール

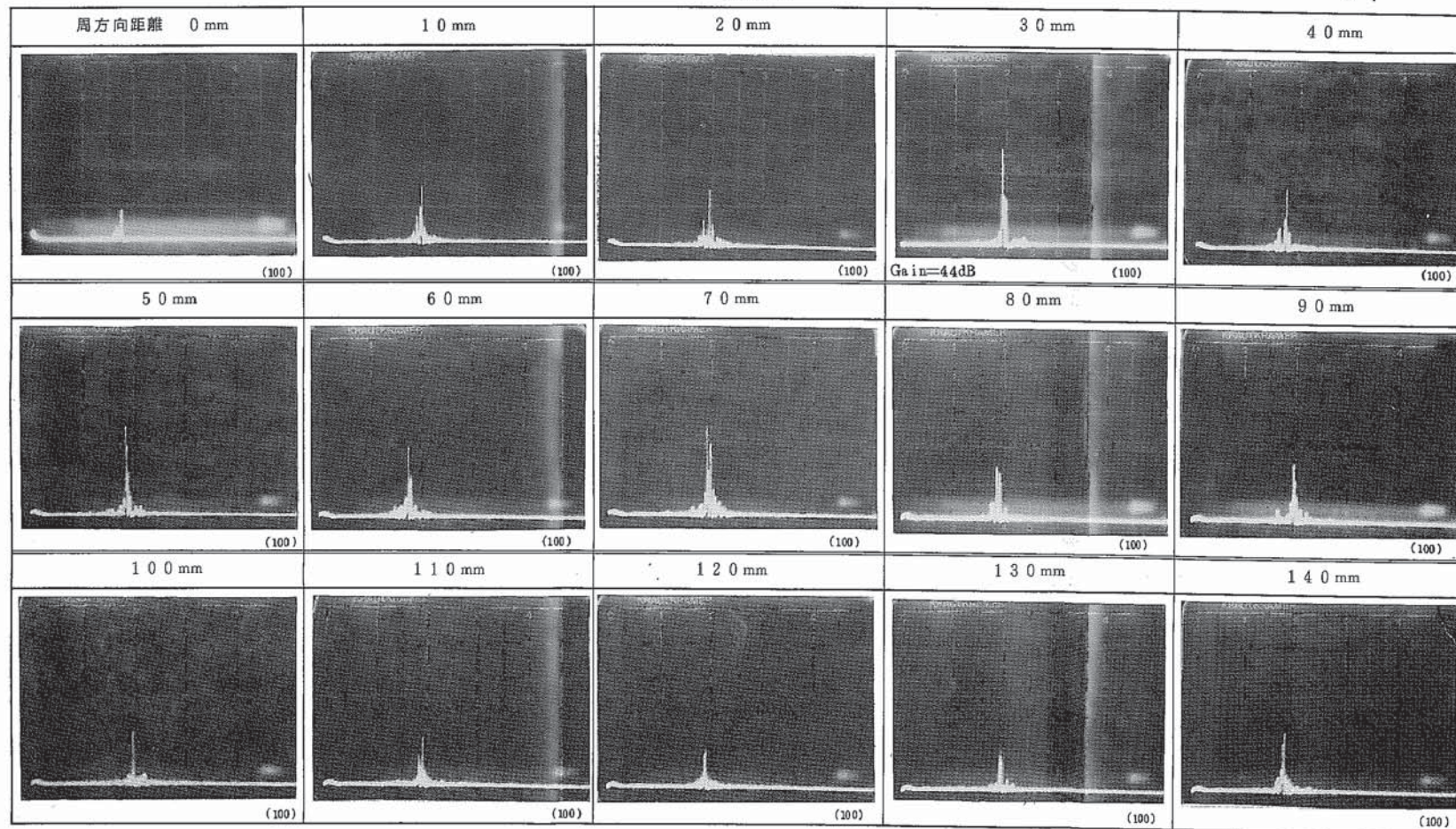
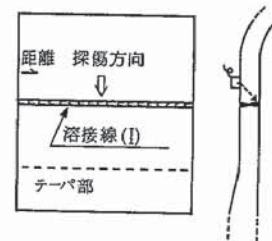


写真 3.2 溶接熱影響近傍部の上部側探傷波形 (板厚 25 mm : 200℃)

Photo 3.2 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal



探触子 : 横波 4.5° (200°C)  
 : 薄肉用センサー  
 探傷方向 : 溶接部下側より入射  
 探傷感度 : 46 dB  
 (CRT 40% が DAC 100% 相当)  
 (但し 0 mm 位置を除く。  
 横軸 : 高温にて横波 100 mm  
 フルスケール

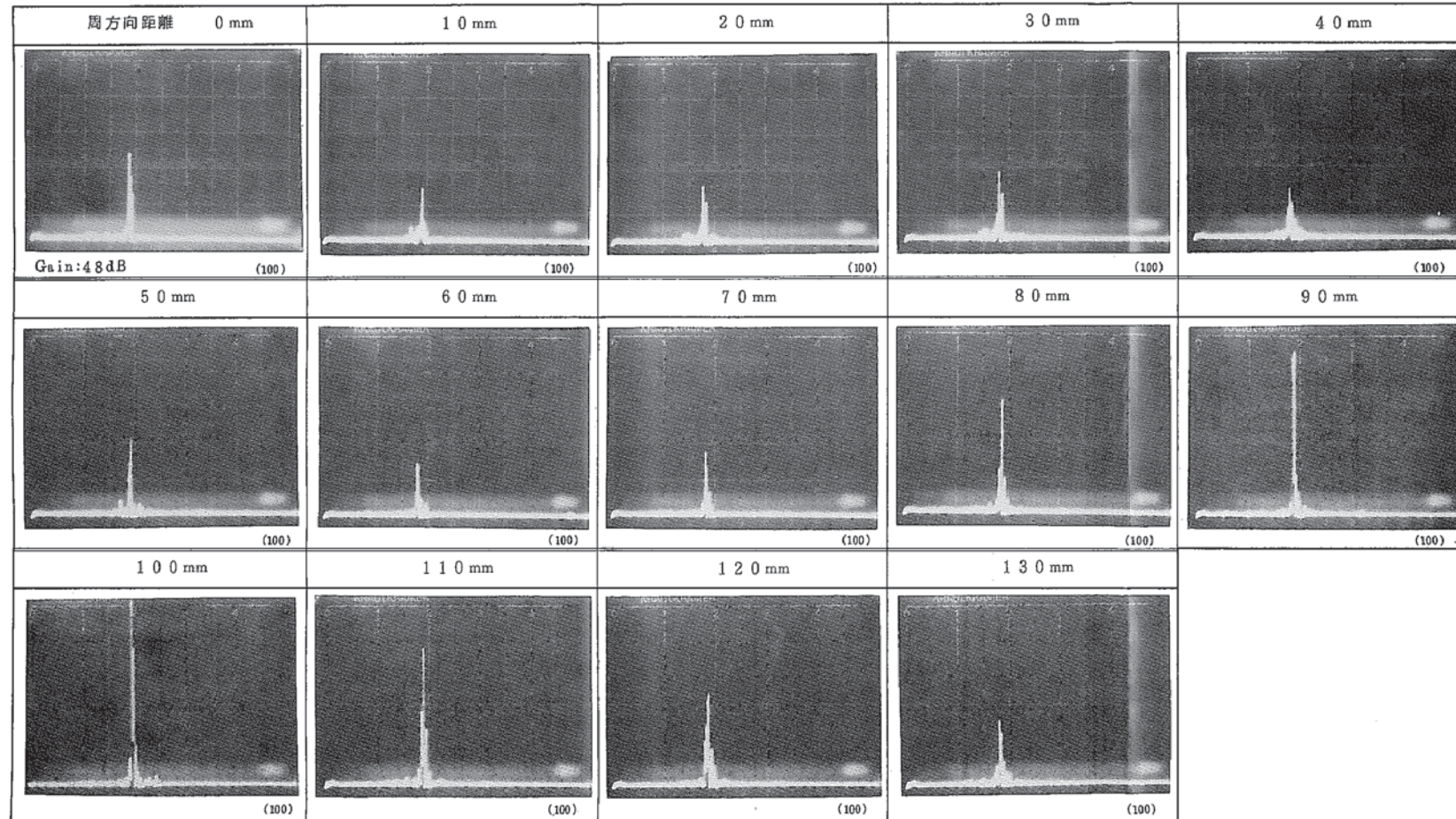
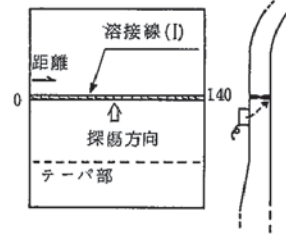


写真 3.3 溶接熱影響近傍部の下部側探傷波形 (板厚 25 mm : 200°C)

Photo 3.3 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal  
(Block Thickness 25 mm : 200°C)

探触子 : 横波 45° (200°C)  
 : 薄肉用センサー  
 探傷方向 : テーパ部へ入射  
 探傷感度 : 46 dB  
 (CRT 40%がDAC 100%相当)  
 但し 140 mm 位置を除く。  
 横軸 : 高温にて横波 100 mm  
 フルスゲール

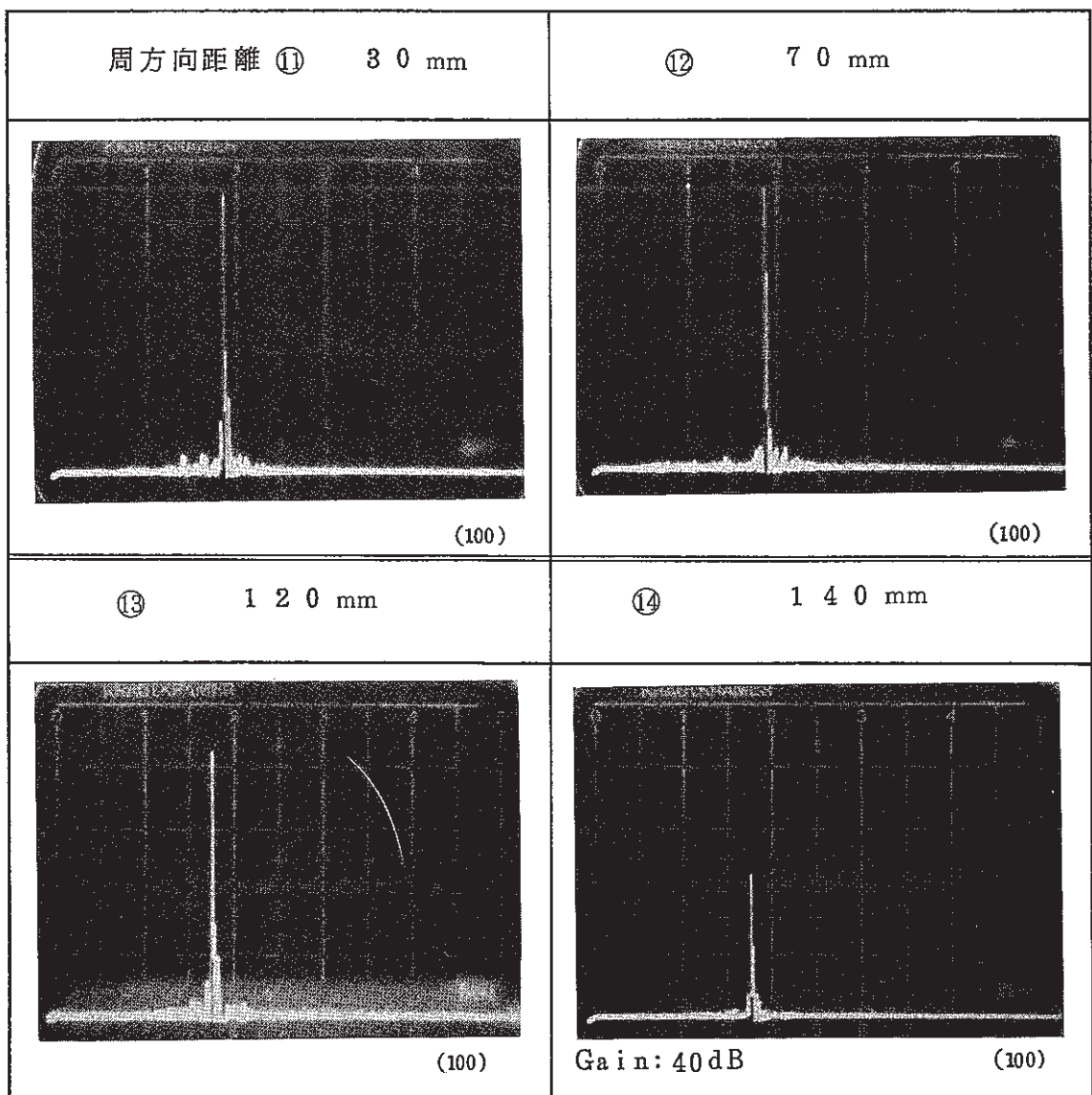
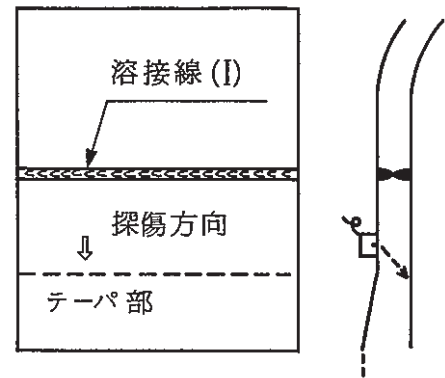


写真 3.4 テーパ部上部側より探傷波形 (板厚 25 mm : 200 °C)

Photo 3.4 Detected Wave Form From Upper Tapering Portion

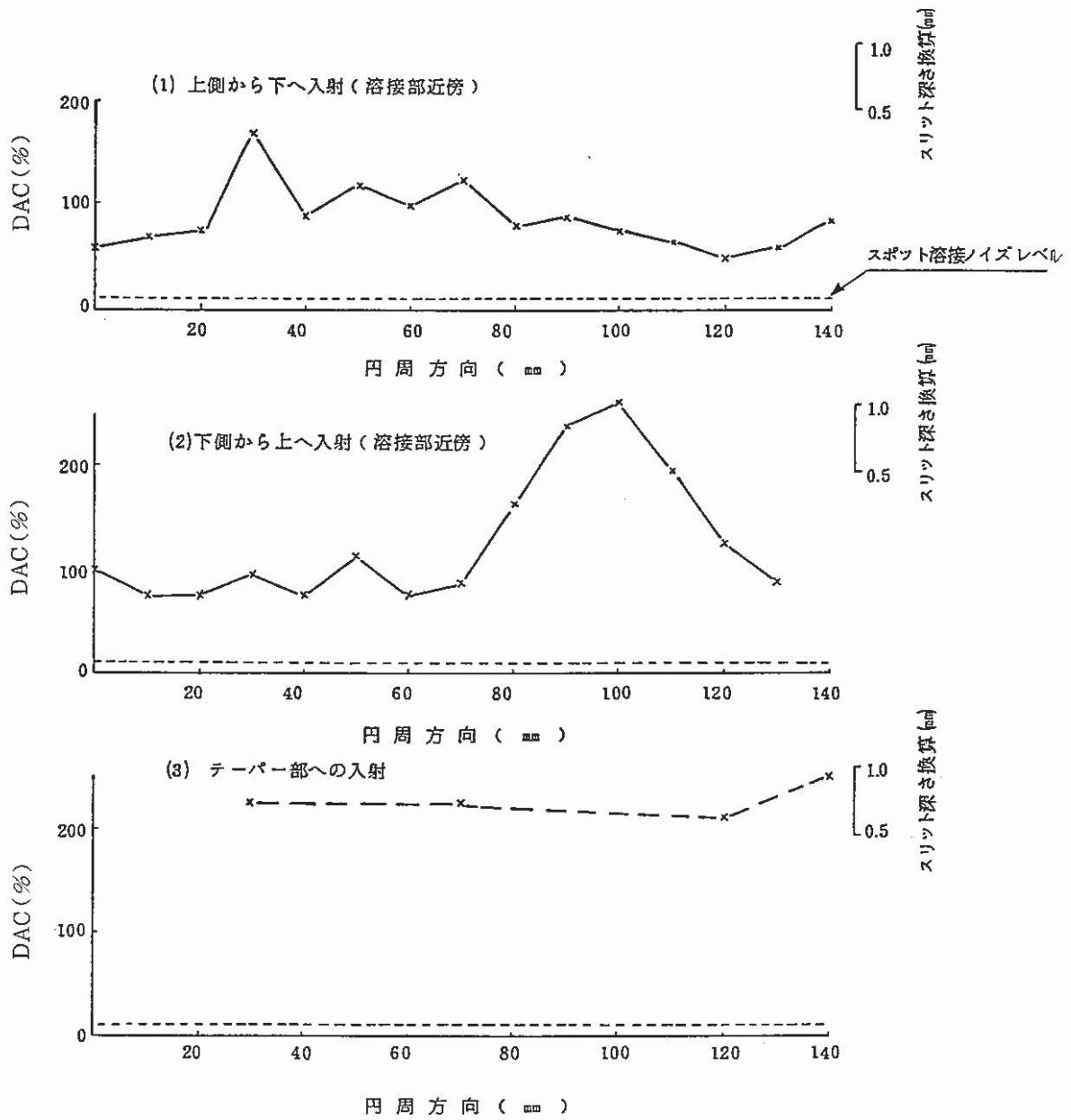


図 3.9 板厚 25 mm 溶接部及びテーパー部探傷結果

Fig. 3.9 Results Traces of Block Thickness 25 mm Weld Metal and Tapering Portion



探触子 : 横波 4.5° (200℃)  
 : 薄肉用センサー  
 探傷位置 : 25mm部 (母材部)  
 探傷感度 : 46dB  
 (CRT40%がDAC100%相当)  
 但し⑥を除く  
 横軸フルスケール : 高温にて横波100mm

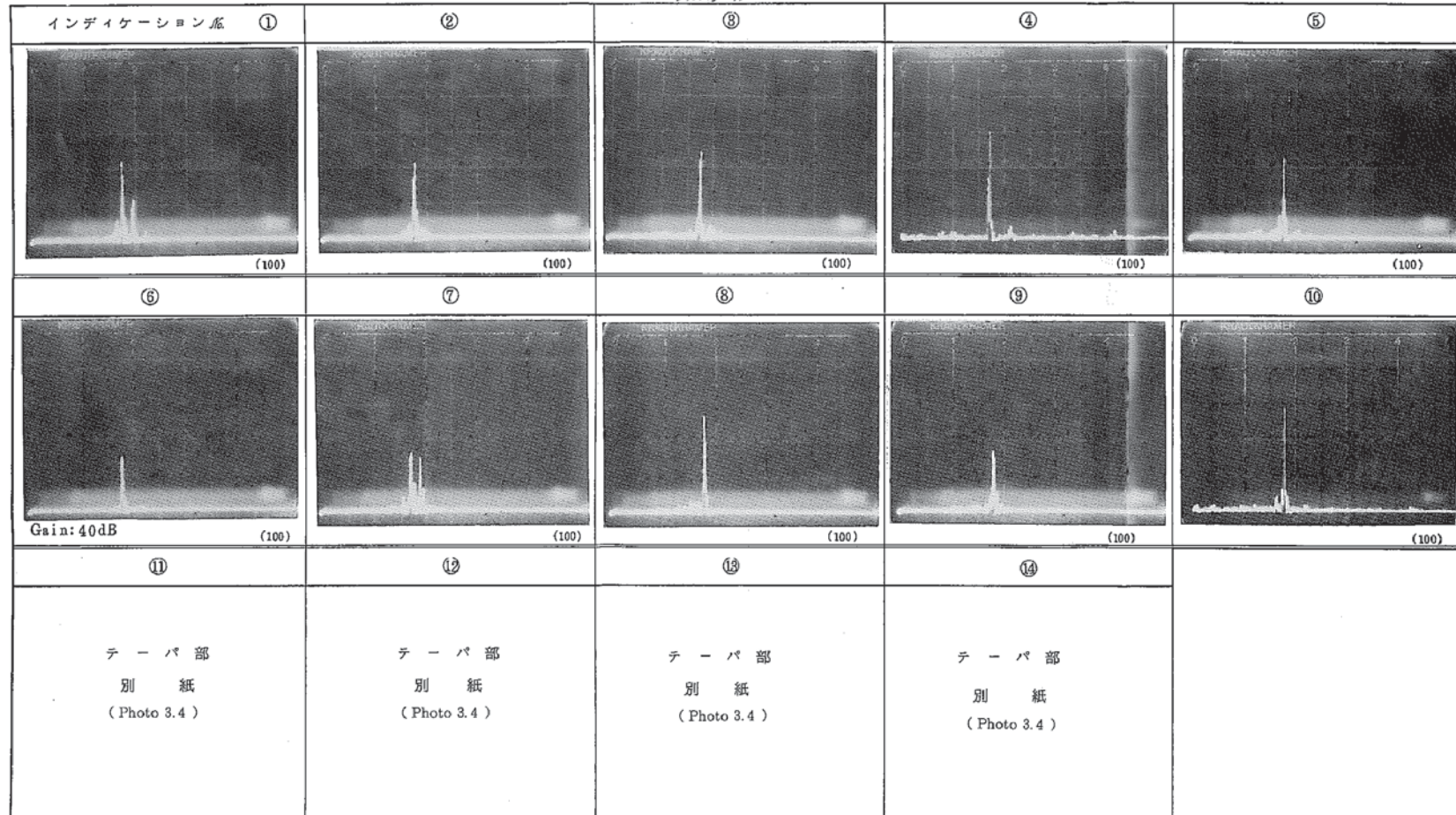


写真3.5 母材部自由探傷波形 (板厚 25mm : 200℃)

Photo 3.5 CRT Traces of Flaw Detection in Base Metal  
 (Block Thickness 25mm : 200℃)

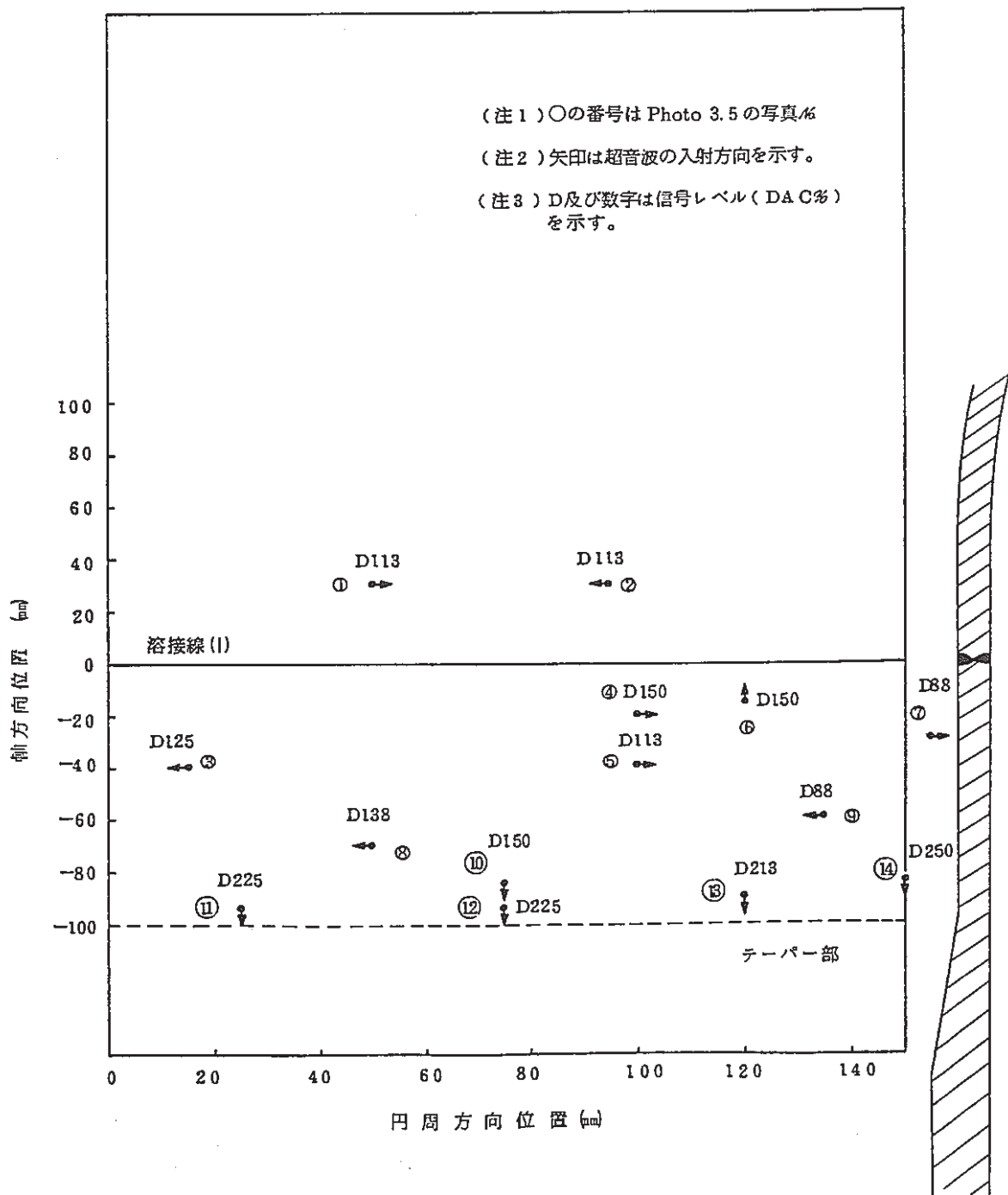


図 3.10 板厚 25 mm 部のインディケーション (自由探傷)

Fig. 3.10 Flaw Detection of Block Thickness, 25 mm

探触子 : 横波 45° (200°C)  
 : 厚肉用センサー  
 探傷位置 : 板厚 40 mm 溶接部  
 探傷感度 : 44 dB  
 : (CRT80 多が DAC100 多相当)  
 横軸 : 高温にて横波 100 mm  
 フルスケール

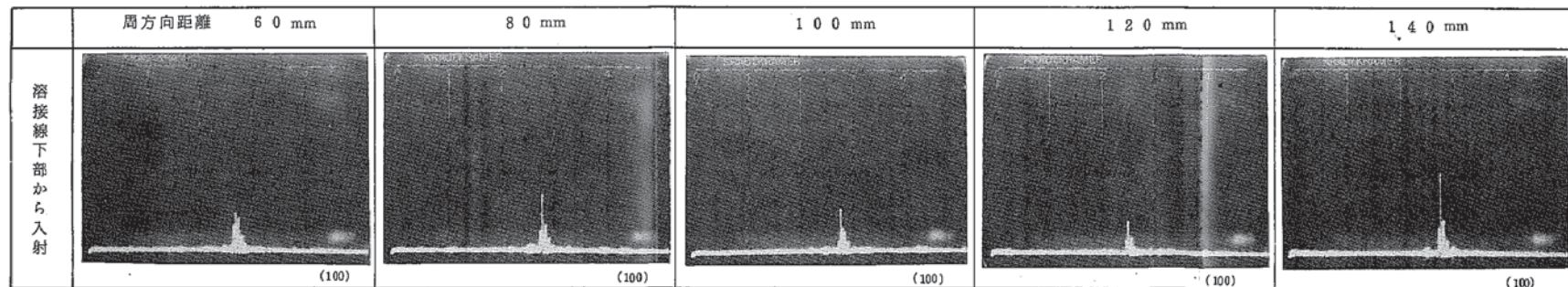
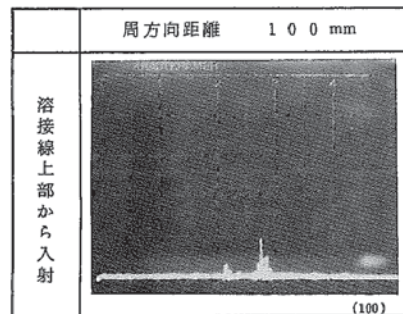
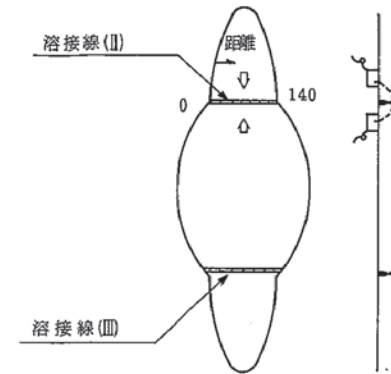


写真 3.6 溶接(II)熱影響近傍部の探傷波形 (板厚 40 mm : 200°C)

Photo 3.6 CRT Traces of Flaw Detection in Heat Affected Weld Metal (II)  
 (Block Thickness 40 mm : 200°C)



探触子 : 横波 45° (200℃)  
 : 厚肉用センサー  
 探傷位置 : 板厚 40 mm 溶接部  
 探傷感度 : 44 dB  
 (CRT 80% が DAC 100% 相当)  
 横軸 : 高温にて横波 100 mm  
 フルスケール

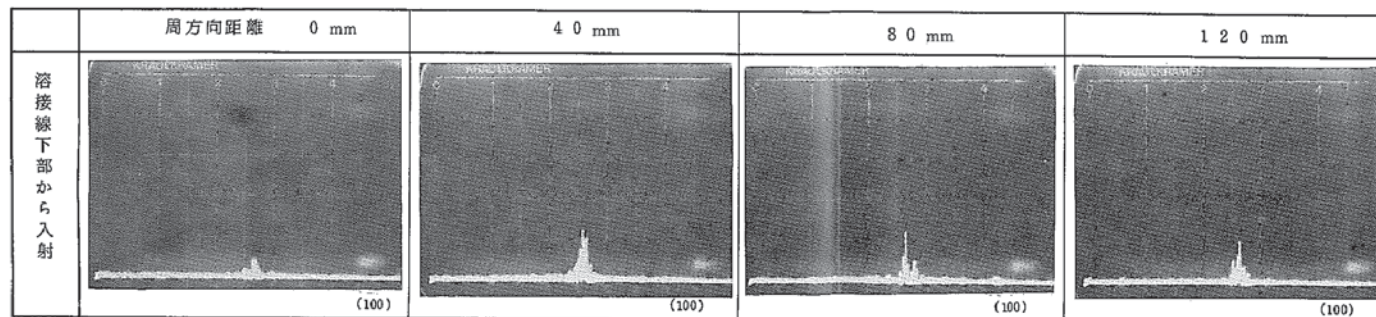
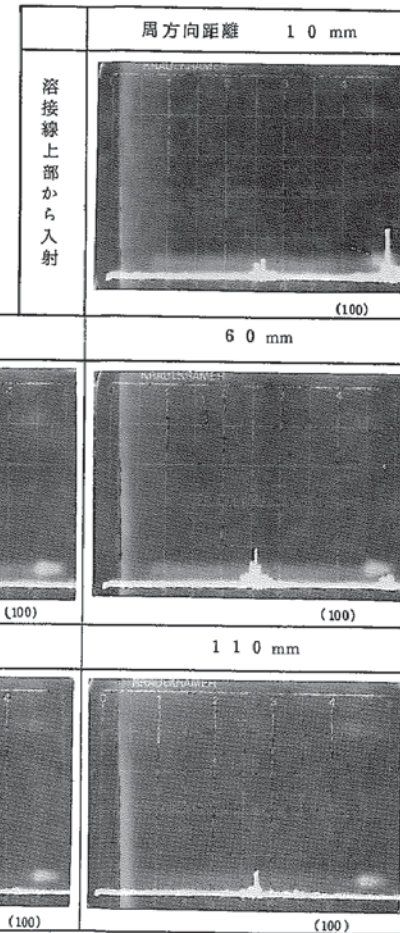
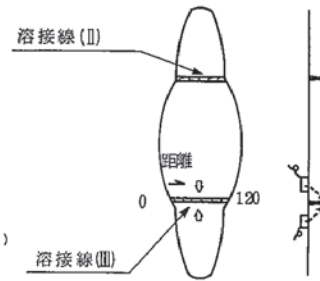


写真 3.7 溶接Ⅲ熱影響近傍部の探傷波形  
 (板厚 40 mm : 200℃)

Photo 3.7 CRT Traces of Flaw Detection  
 in Heat Affected Weld Metal (III)  
 (Block Thickness 40 mm : 200℃)

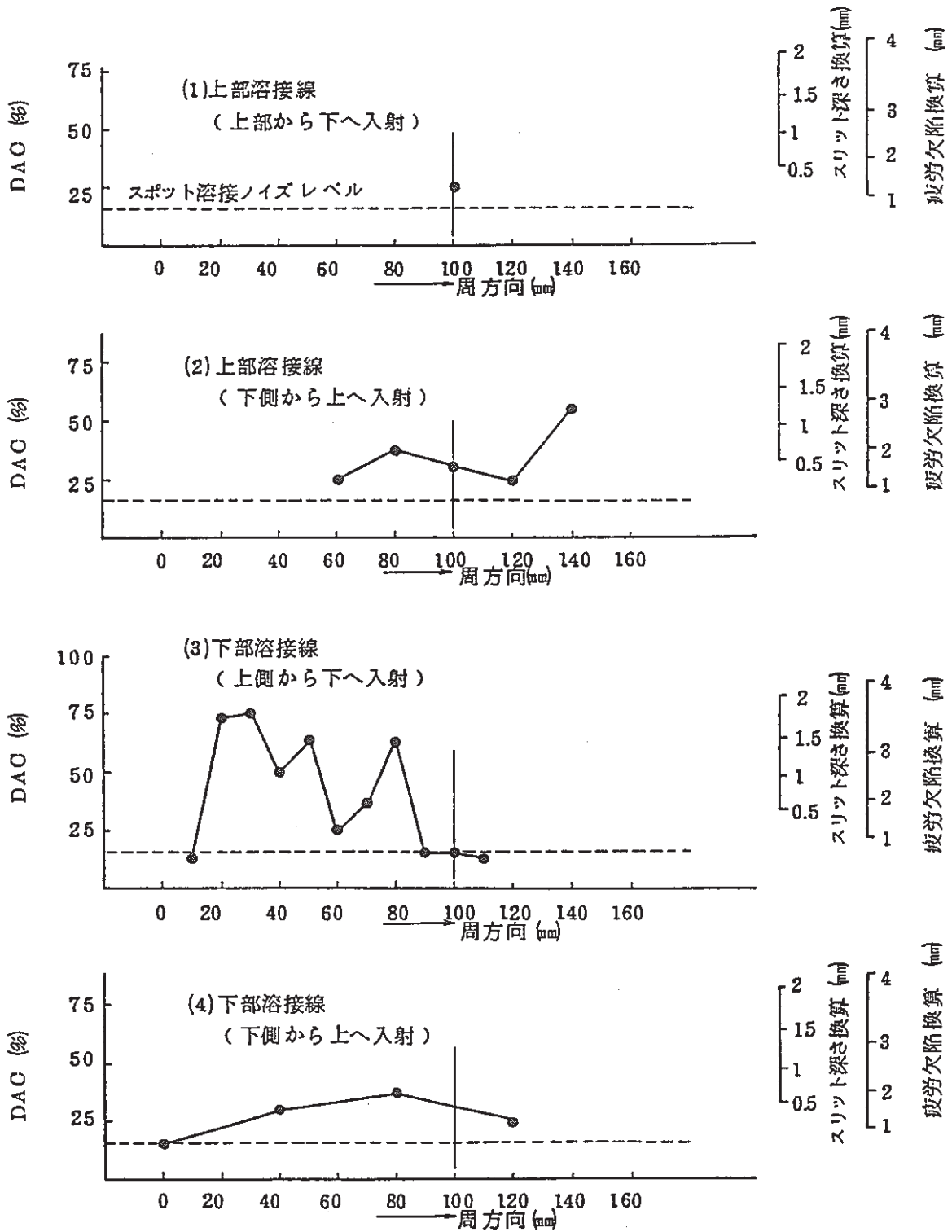


図 3.11 板厚 40 mm 溶接部探傷結果

Fig. 3.11 Result Traces of Block Thickness 40 mm Weld Metal



探触子 : 横波 45° ( 200℃ )  
 : 厚肉用センサー  
 探傷位置 : 板厚 40 mm 部 ( 母材部 )  
 探傷感度 : 44 dB  
 : ( CRT 80% が DAC 100% 相当 )  
 横軸 : 高温にて横波 100 mm  
 フルスケール

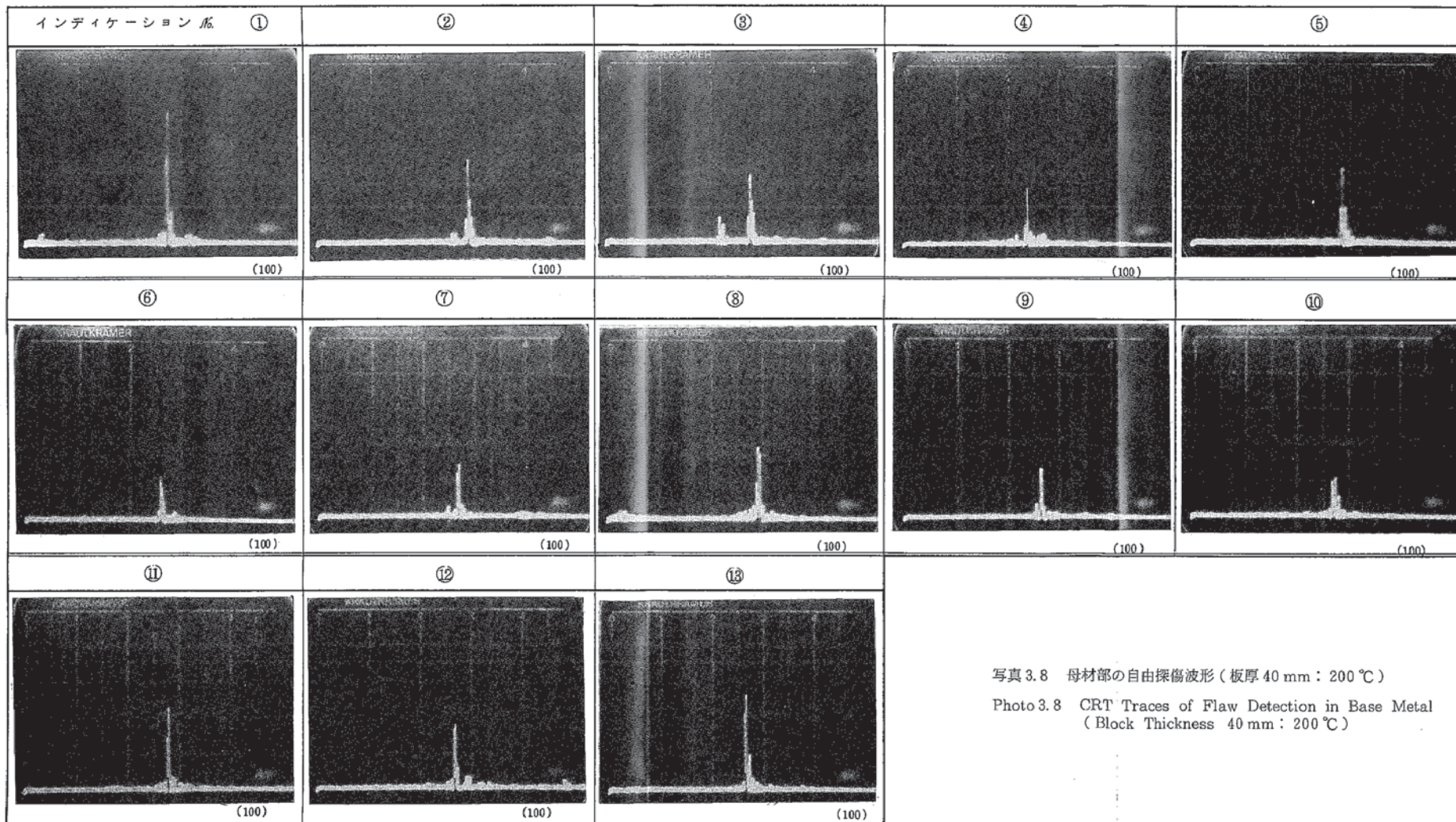


写真 3.8 母材部の自由探傷波形 ( 板厚 40 mm : 200℃ )  
 Photo 3.8 CRT Traces of Flaw Detection in Base Metal  
 ( Block Thickness 40 mm : 200℃ )

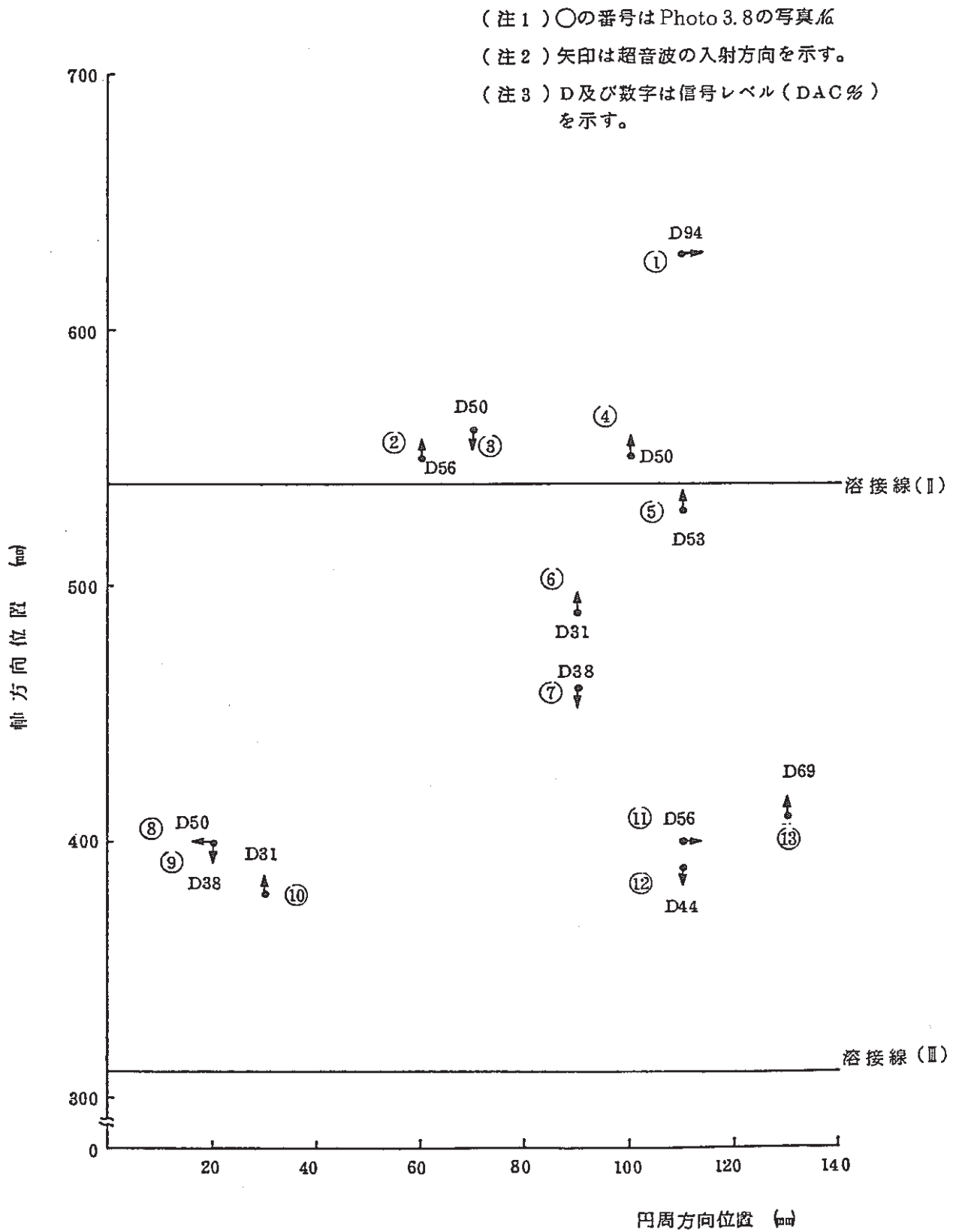


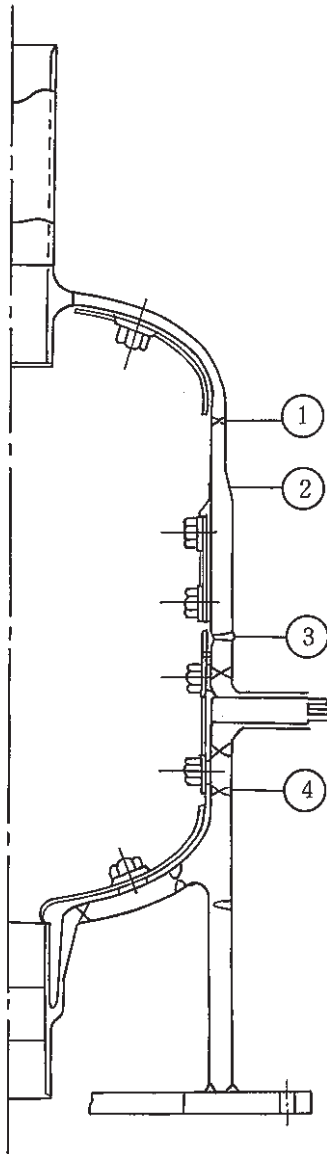
図3.12 板厚40 mm部のインディケーション(自由探傷)  
 Fig. 3.12 Result Traces of Block Thickness 40 mm

表 3.1 超音波探傷結果と亀裂観察結果の比較

Table 3.1 Comparison of Ultrasonic Testing and Crack Distributions

位置(板厚)	き裂深さ	超音波探傷結果		亀裂観察結果
		スリット換算	疲労欠陥換算	
① 上部鏡・上部胴(25)		0.5 ~ 1.0	—	5.0 ~ 7.3
② シンニング部(25~40)		0.5 ~ 1.0	—	10.0 ~ 11.4
③ 最終溶接部(40)		2.2	4.2	7.0 ~ 26.6
④ 下部胴・コニカル胴(40)		2.0	5.6	1.1 ~ 1.4

(単位 mm)





探触子： 横波45°  
 : 薄肉用センサ  
 温度： 常温  
 試験片： 板厚20mm (SUS曲率あり)  
 感度： 46dB

探触子： 横波45°  
 : 厚肉用センサ  
 温度： 常温  
 試験片： 板厚50mm (SUS)  
 感度： 44dB

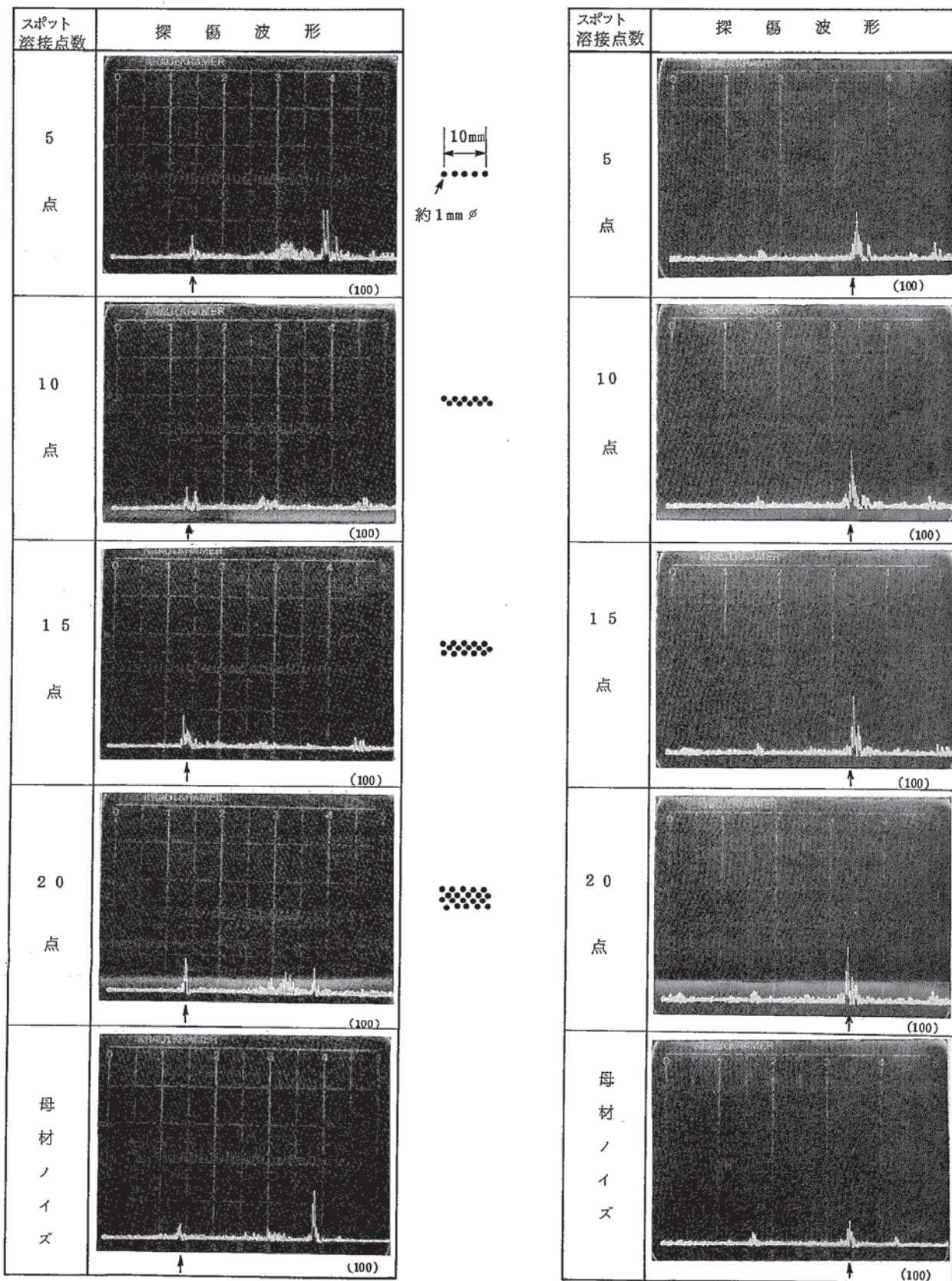


写真3.9 スポット溶接と探傷波形(常温)

Photo 3.9 Wave Form of Quasi-Defect of Spot Weld

## 4. 室温超音波探傷試験

3.項では、供試体内を約 200 °C のナトリウムが流れた状態での超音波探傷検査結果について述べた。本章では、供試体解体前に超音波探傷検査を行った結果について述べる。

### 4.1 検査対象

Fig. 4.1 に超音波探傷検査の対象とした箇所を示す。溶接部近傍に発生する内面欠陥を対象に探傷した。対象箇所の検査条件は以下の通りである。

- 材 質 : SUS 304
- 板 厚 : 25 mm 及び 40 mm
- 被検体温度 : 室温
- 被検体内部 : 大気

### 4.2 使用機器

- 1) 超音波探触子
  - 型 式 MWB 45 (クラウトクレーマ製)
  - 探傷周波数 2.25 MHz
  - 屈折角 45°
- 2) 超音波探傷器
  - 型 式 USIP - 11 (クラウトクレーマ製)
- 3) カプラント
  - 型 式 KF - 54 (シリコンオイル)
- 4) 試験片
  - 材 質 SUS 304
  - ドリル穴径 2.4 mm $\phi$ , 3.2 mm $\phi$

### 4.3 超音波探傷結果

Fig. 4.2 にドリル穴径が異なる DAC 測定結果を示す。

#### 4.3.1 板厚 25 mm 部 (上部錆・上部胴)

Fig. 4.1 の切断箇所③の上部の溶接線近傍を下側 (切断側) より探傷した結果を Fig. 4.3 に示す。この結果、溶接部近傍で認められる信号レベルは殆ど全ての円周上で DAC 100 % 以上の信号が認められた。また、テーパ部近傍及び母材側に於ても前項の超音波探傷結果と同様の

信号が認められた。

#### 4.3.2 板厚 40 mm 部 (上部胴・下部胴)

Fig. 4.1 の切断箇所②の上側と下側より探傷した結果を Fig. 4.4 に示す。この結果、最終溶接部で上部及び下部側とも DAC 100%以上の高い信号レベルが全円周上で認められた。

#### 4.3.3 板厚 40 mm 部 (下部胴・コニカル胴)

Fig. 4.1 の切断箇所⑤の上側の溶接部近傍を探傷した結果を Fig. 4.5 に示す。この結果より溶接近傍部では円周上の特定位置で DAC 100%程度の信号レベルが認められた。他の部位では特に高い信号レベルは認められなかった。

#### 4.3.4 板厚 40 mm (スカート)

Fig. 4.1 の切断予定箇所上側にある溶接線近傍部を探傷した結果を Fig. 4.6 に示す。この結果、溶接近傍部では DAC 100%程度の信号レベルが特定位置で認められたが、他の部位では特に高い信号レベルは認められなかった。

### 4.4 まとめ

炉容器供試体の板厚 25 mm 及び 40 mm の部位について探傷を行った。この結果、上部鏡一胴の溶接線近傍、最終溶接部で全円周上に DAC 100%以上の信号が認められた。



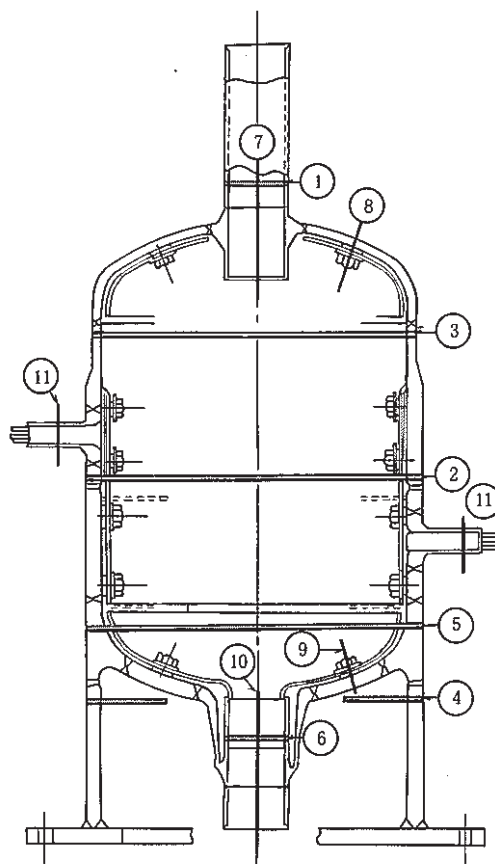


図 4.1 超音波探傷検査箇所

Fig. 4.1 Area of Ultrasonic Examination

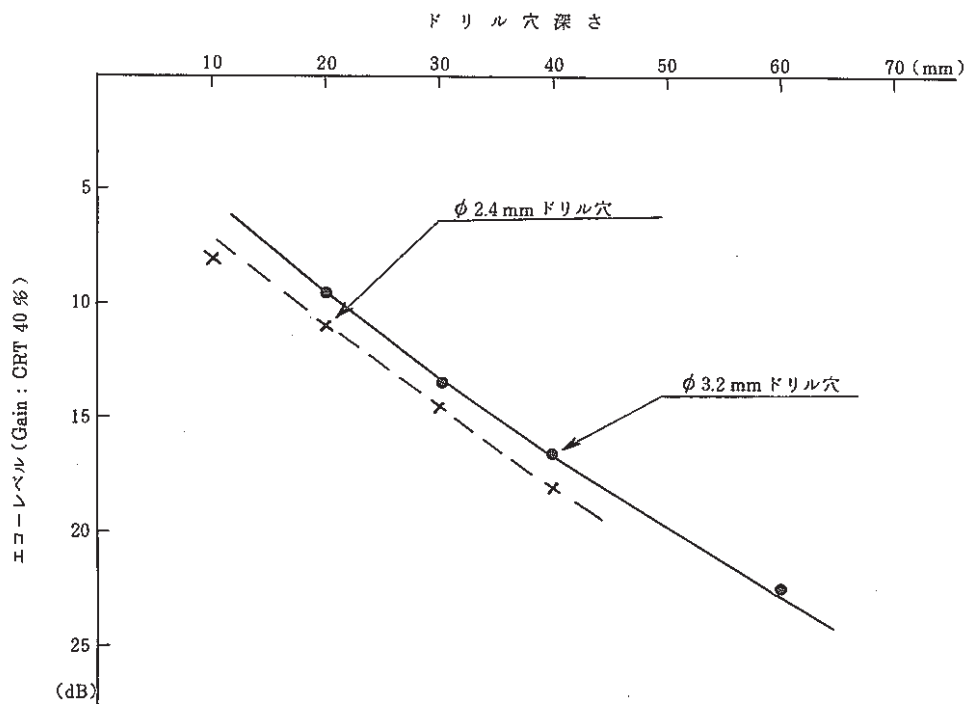


図 4.2 DAC測定結果

Fig. 4.2 Test Results of DAC

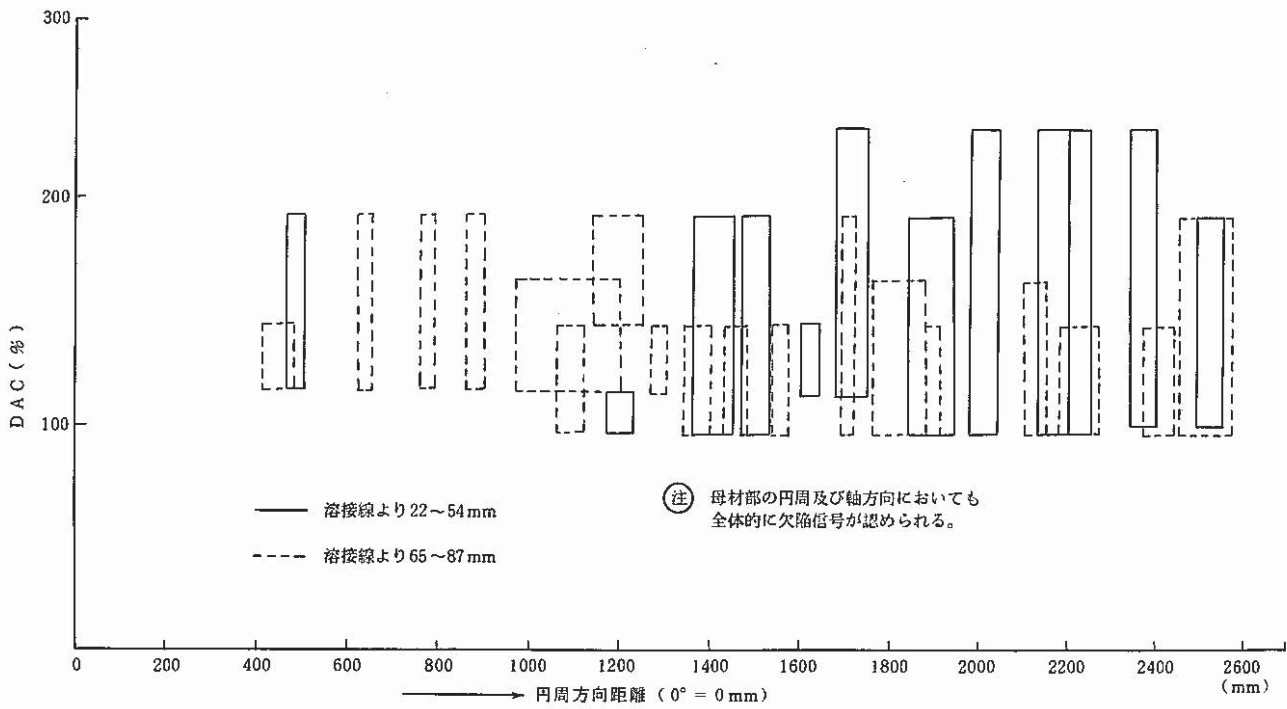


図 4.3 ③ (板厚 25 mm) 溶接近傍部の探傷結果 (下側より上へ入射)

Fig.4.3 Result Traces of Weld near Metal ③ (Block Thickness 25 mm)

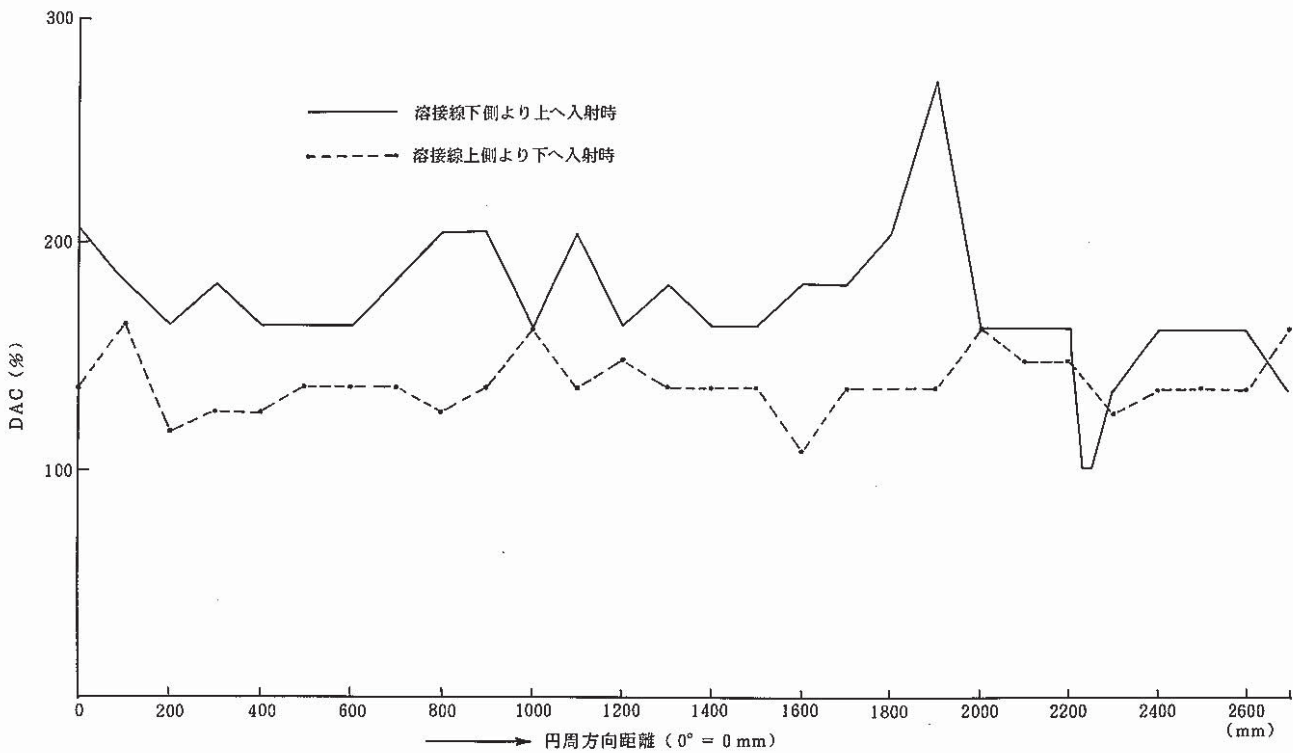


図 4.4 ② (板厚 40 mm) 溶接近傍部の探傷結果

Fig.4.4 Result Traces of Weld near Metal ② (Block Thickness 40 mm)

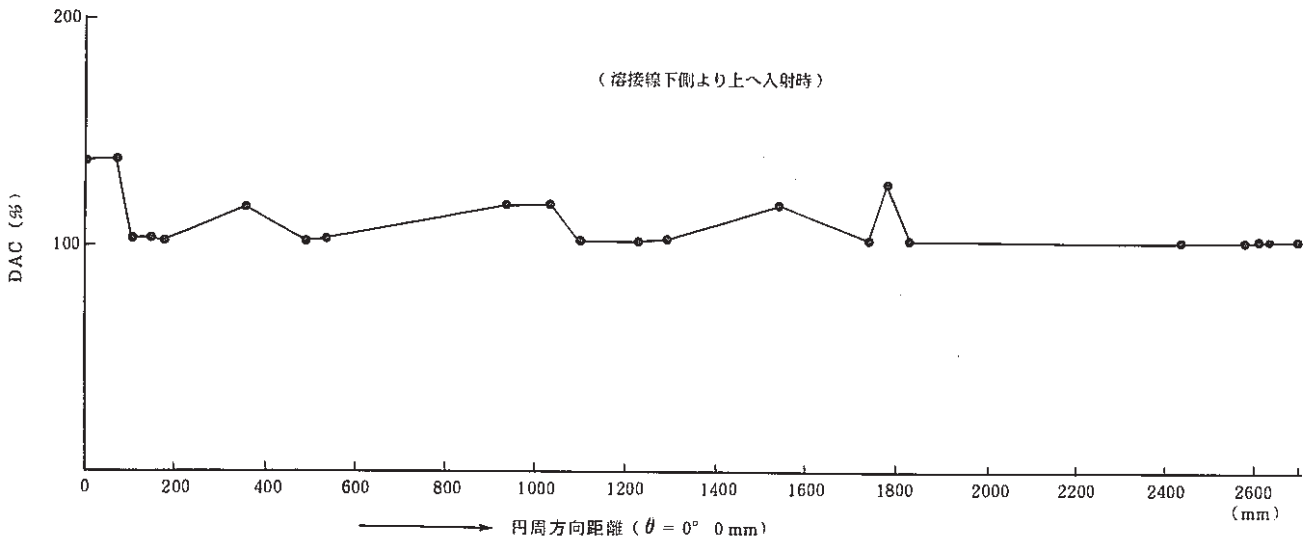


図 4.5 ⑤ (板厚 40 mm) 溶接線近傍部の探傷結果

Fig.4.5 Result Traces of Weld near Metal ⑤ (Block Thickness 40 mm)

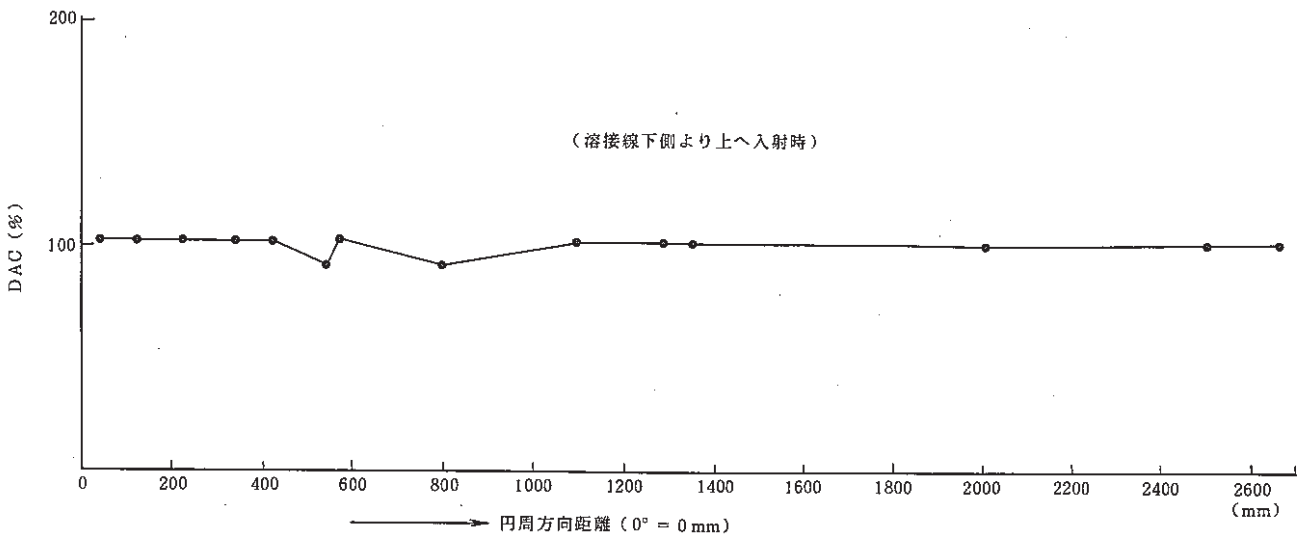


図 4.6 ④ (板厚 40 mm) 溶接線近傍部の探傷結果

Fig.4.6 Result Traces of Weld near Metal ④ (Block Thickness 40 mm)

## 5. A E

### 5.1 AE計測装置および計測方法

#### 5.1.1 AE計測装置

AE計測は、Fig. 5.1に示す4チャンネルAE計測装置を用いて行った。本AE計測はAE信号処理部およびAEデータ記録部より構成される。

AE信号処理部はAEセンサー、プリアンプ、シグナルコンディショナ、レベルディテクタおよびオーディオモニタより成り、AEデータ記録部はコンソール、ディスク装置、プリンタなどの周辺装置を有するコンピュータおよびインタフェイスロジックより成る。AE計測装置と同時にRMS電圧計（交流電圧計）、オシロスコープおよび波形記憶装置を常時または適宜用いた。使用装置の一覧表をTable 5.1に示す。

つぎに各装置の機能について述べる。

##### (1) AEセンサー

AEセンサーは、計測対象機器内部（供試体）で発生したAE波（弾性波動）を電気的信号に変換する。ここで用いた404AD型センサーは、PZT圧電セラミックを用いた差動型センサーである。差動型は一般にシングルエンド型に比較して電気的環境雑音に強い。404AD型センサーの周波数特性例をFig. 5.2に示す。周波数特性としては100 KHz～500 KHzで平坦である。

##### (2) プリアンプ

プリアンプは、通常AEセンサーの近傍に設置し、AEセンサーの出力信号を増幅してシグナルコンディショナまでのケーブルを負荷として駆動するために用いられる。ここで用いたプリアンプは、差動入力を有し、利得は36 dBで、10 KHz～2 MHzにわたってほぼ平坦な特性である。

##### (3) シグナルコンディショナ

シグナルコンディショナは、プリアンプからの信号をさらに増幅し、次段のレベルディテクタやオーディオモニタに供給する。ここで用いたNDT 251型は、100, 200, 400および800 KHzのカットオフ周波数を選択できるハイパスフィルタ（-36 dB/octave）を有しており、利得は100 KHz～2 MHzにわたってほぼ平坦であり、連続可変減衰器によって0～30 dBの間に設定することができる。

##### (4) レベルディテクタ

レベルディテクタは、シグナルコンディショナの出力を受け、しきい値電圧と比較してFig. 5.3に示すようにデジタルパルスを出力する装置である。しきい値電圧は、0～1 Vの間で連続的に設定できる。

## (5) オーディオモニタ

オーディオモニタは、シグナルコンディショナの出力の放絡線処理を行い、増幅した後スピーカを駆動する装置である。これにより、AE信号や雑音を人間の耳で聴くことができる。ただし、聴こえる音は、AEや雑音そのものではない（周波数範囲が可聴域外）。

## (6) コンピュータおよび周辺装置

コンピュータは語長 16 ビットで、64 KB の大きさのメモリを有するマイクロコンピュータで、リアルタイム・マルチタスク OS である MP/OS により制御されている。外部記憶装置としては 25 MB の容量の固定ディスク装置および 1.2 MB の容量のフロッピディスク装置 2 ドライブを持っている。AE計測中は、計測データは固定ディスクに書き込まれ、フロッピディスクはデータを外部に取出す際に用いる。

AE計測中に、プリンタにデータを打出すことも可能であるが、プリンタの速度が遅いため通常は打出しを止めておく。デジタルI/OはAEデータのインタフェイスロジックからの取り込み、およびインタフェイスロジックへの制御信号の出力に用いられる。入出とも 16 ビットパラレルである。アナログ出力は累積イベント数の監視に用いられる。累積イベント数はAE計測開始時に設定されたスケールファクタによってアナログ電圧に変換され、チャートレコーダに記録される。アナログ出力は 2 チャンネルであり、1 つは全ての位相範囲の累積イベント数を、他の 1 つは限定された位相範囲に対する累積イベント数を出力する（ただし、位相範囲限定の機能は今回は使用していない）。チャートレコーダには、アナログ出力による累積イベント数に加えて RMS 電圧計による RMS 電圧を記録する。RMS 電圧計は、4 つのシグナルコンディショナの出力のうち 1 つに接続されており、その指示にはモニタ領域外からの信号や雑音による電圧も含まれている。オシロスコープおよび波形記憶装置は、適時信号を監視するために用いる。波形記憶装置は最高書込速度 100 ns/word で 4 KW のメモリを 2 チャンネル持っている。コンピュータインターフェイスを有していないため、オンライン接続とはしていない。

## 5.1.2 AE計測パラメータ

AE計測パラメータとしては、イベント数、到着時間差、リングダウンカウント、サイクル数および位相を計測した。イベント数とは、設定された最大到着時間差以内に到着するような AE 信号の数であり、イベント監視時間以内に来る信号は引続いた 1 つのイベントとして扱われる。到着時間差は最初に到着したチャンネルを基準として、0.1  $\mu$ s 単位で計測される。リングダウンカウントは、1 つのイベント内にある Fig. 5.3 のレベルディテクタの出力パルス数である。

サイクル数は、熱過渡サイクルの数であり、構造物強度確性試験施設 (TTS) の制御装置 (DCS) から出力されるモード 3 信号の立上りの回数をカウントしている。位相は、モード 3

信号の立上りからある AE イベント発生までの時間を示す。位相は秒単位で計測している。

### 5.1.3 AE センサの取付方法

AE センサは、Fig. 5.4 に示すウェーブガイド取付バンドを用いて Fig. 5.5 のウェーブガイド取付治具を取付け、そのウェーブガイドを介して供試体と音響的に結合した。AE センサの取付位置を Fig. 5.6 に示す。

### 5.1.4 AE センサ配置およびモニタ領域

AE センサの配置を胴部展開図上に示したものが Fig. 5.7 である。Fig. 5.7 中にモニタ領域 I およびモニタ領域 II として示した領域が、伝播速度  $2700 \text{ m/s}$ 、最大到着時間差  $99.9 \mu\text{s}$  の場合のモニタ領域である。モニタ領域 I とモニタ領域 II とは、AE 計測データ上は同一の領域として取扱われる。また、モニタ領域は、伝播速度の不均一、波形の変化等の理由によって実際には必ずしも上記の伝播速度  $2700 \text{ m/s}$ 、最大到着時間差  $99.9 \mu\text{s}$  の計算値とは一致しない場合がある。

### 5.1.5 AE 計測条件

AE 計測時に設定した計測条件を Table 5.2 に示す。増幅ゲインはプリアンプ  $36 \text{ dB}$ 、シグナルコンディショナ  $26 \text{ dB}$  で合計  $62 \text{ dB}$  とした。この値は通常材料試験における AE 計測時の値（約  $70 \text{ dB}$ ）よりいく分低目であるが、これはナトリウム流動等による雑音のために増幅器が飽和してしまうことを防ぐためである。フィルタのカットオフ周波数は  $100 \text{ KHz}$  とした。これは、雑音と AE の周波数スペクトル分布を考慮し、決定した。しきい値電圧は、センサ出力換算で  $120 \mu\text{V}$  とした。この値は材料試験時の値（ $100 \mu\text{V}$ ）よりやや高目であるが、やはり今回の試験で高雑音を予想して決定した。イベント監視時間は、通常材料試験で用いられている値（ $1 \text{ ms}$ ）を採用した。

## 5.2 AE 計測結果

### 5.2.1 AE 計測経過

供試体の据付完了後、AE 計測装置の設置、ケーブルの敷設、ウェーブガイド取付バンド、ウェーブガイド取付治具、ウェーブガイド、AE センサおよびプリアンプの取付、計測装置の接続ならびに伝播速度の計測作業を行った。伝播速度の計測において、当初予定したパルスジェネレータによる擬似 AE 信号の発信は、それによって生じる擬似 AE 波の振幅が小さく、使用不可能であることがわかった。そのため、小型のハンマを用いて保温より露出した供試体スカート部を軽くたたく方法をとった。この場合、発生する擬似 AE 波の再現性を確保することは困難であり、波形も実際の AE およびパルスジェネレータによって入力した擬似 AE 波とは異



なる。また擬似 AE 波入力点も限定された部位であったため、正確な伝播速度および減衰の計測は不可能であった。しかし、チャンネル D の下方スカート分より擬似 AE 波を入力した場合にチャンネル D およびチャンネル A の間の到着時間差が約 350  $\mu$ S であったことより伝播速度  $v$  (m/S) は、

$$v = \frac{0.94}{350 \times 10^{-6}} \approx 2700 \text{ (m/S)}$$

となり、AE 波を入力できないことより、行わなかった。

供試体の予熱昇温から試験条件設定までの間に発生するノイズの計測を行ったところ、特定の期間において著しいノイズの発生が見られた。このように著しいノイズまたは AE の発生があると AE 計測に支障をきたす恐れがあること、および正確な位置標定の確認を行っていないことにより、実際の AE 計測器の最大到着時間差は 99.9  $\mu$ S とした。その後、1002 サイクルの熱過渡試験時の AE データを取得した。

## 5.2.2 AE 計測結果

Fig. 5.8 に、全計測期間中の熱過渡サイクル数と累積 AE イベント数の関係を示す。全計測期間中に発生した AE イベントの総数は、約 285,000 イベントであった。Fig. 5.8 からわかるように、サイクル数約 700 サイクル以前とそれ以後とでは、AE イベント数の巨視的な増加傾向に差がある。すなわち、約 700 サイクル以前では累積 AE イベント数は、サイクル数に対してほぼ一定の勾配で単調に増加しているのに対して、約 700 サイクル以後ではそれ以前よりも増加率が大きい。さらに、約 800 サイクル付近からはより増加率が大きく下に凸の曲線状を呈している。Fig. 5.8 を細かく見ると、約 140 サイクル付近で AE イベント数が約 10,000 イベント増加している部分が見られる。これらは Fig. 5.11 のリングダウン発生率で見ると他のサイクルの時にも発生していることから電気パルス的なノイズを拾ったものと思われる。

Fig. 5.9 は、熱過渡サイクル数と累積リングダウンカウントの関係を示したものである。累積リングダウンカウントも、Fig. 5.8 の累積イベント数と同様の増加傾向を示しているが、約 700 サイクル以降における勾配の変化の程度は、Fig. 5.8 の場合より大きい。

Fig. 5.10 および Fig. 5.11 は、10 サイクル毎の AE イベント発生率および 10 サイクル毎のリングダウンカウント発生率を、熱過渡サイクル数に対して示したものである。これらより、AE イベント発生率およびリングダウンカウント発生率は、細かな凹凸はあるが、約 700 サイクルまでは約 200 イベント / 10 サイクルおよび 250,000 カウント / 10 サイクルでほぼ一定である。しかし、それ以後では発生率は約 2 ~ 3 倍以上にまで増加している。これは、Fig. 5.8 及び Fig. 5.9 に見られる増加傾向の変化に対応するものである。

次に、熱過渡サイクル内での AE 発生タイミングを調べるために、連続した 10 サイクルの期間における位相区間（ここで、位相区間とは熱過渡サイクルの 1 サイクル、すなわち 7200

秒を 100 当分した 72 秒間を指す。) 各々の AE イベント数および各 AE イベントのリングダウンカウントを Fig. 5.12, Fig. 5.14 および Fig. 5.13, Fig. 5.15 に示す。Fig. 5.12, Fig. 5.14 は 320 ~ 329 サイクル, また Fig. 5.13, Fig. 5.15 は 950 ~ 959 サイクル間の結果を表示している。これらの図に共通していえることは, 大部分の AE イベントはコールドショックおよびホットショックの直後に発生している点と, コールドショックによる AE イベントは短時間に集中して発生しているのに対して, ホットショックによる AE イベントは時間の経過と共に漸減する傾向を示し, ホットショック直後の AE 発生数はコールドショック直後の AE 発生数に比べて少なく, 1 イベントあたりのリングダウンカウントも小さい。また, Fig. 5.12 (14) と Fig. 5.13 (15) の異なる点は, 本試験の終了直前の方が, 試験初期に比べて AE イベント発生数と 1 イベントあたりのリングダウンカウント数が大きいという点である。

Fig. 5.16 と Fig. 5.17 は 1 イベントあたりのリングダウンカウント数の分布を, 試験中期の 10 サイクルと試験終了直前の 10 サイクルについて示したものである。前述の Fig. 5.12 から Fig. 5.15 に見られた試験終了直前における高リングダウンカウントの AE イベントの増加傾向が, Fig. 5.16 と Fig. 5.17 のリングダウンカウント 1000 から 2000 のところでも明瞭に現れている。

Fig. 5.18 および Fig. 5.19 は AE イベントの位置標定結果を示したものである。Fig. 5.18 は試験中期の結果であり, Fig. 5.19 は試験終了直前の 10 サイクルの結果である。これらの図では, 各象限ごとに標定された AE イベントの密度にばらつきが見られるが, これは 4 つのチャンネル間の感度のアンバランスによるものと思われる。ここで, 各チャンネルの感度は電氣的には同一となるように調整しているので, このようなアンバランスの原因は供試体とウェーブガイドとの接触部における音響的伝達特性のばらつきであると考えられる。従って AE イベントの位置標定を行う場合, 各象限ごとの AE イベントの発生状況に着目して行う必要がある。

Fig. 5.20 ~ Fig. 5.22 は, AE モニタ領域を縦, 横共に 20 分割し, (400 ブロックに分割) 各ブロックごとの AE イベント数をプロットしたものである。Fig. 5.20 はトータルのイベント数を, Fig. 5.21 はコールドショック時のイベント数を, そして Fig. 5.22 はホットショック時のイベント数をプロットしたものである。各象限ごとに AE イベント数の多いブロックをピックアップしてみると, ホットショック及びコールドショック共に, その分布はほぼ同じ傾向を示していることがわかる。

また, ホットショック時とコールドショック時の AE イベントの発生数を比較してみると, 上部胴と下部胴の溶接部より下方 (主に第 3, 第 4 象限) では, 全てのブロックでホットショック時の方が多くの AE イベントを発生しており, 同溶接部より上方 (第 1, 第 2 象限) では, 約 50 % のブロックでコールドショック時に多くの AE イベントが発生している。

一方, AE イベントの分布とき裂の発生状況の対比を行うために, モニタ領域 I およびモニタ領域 II に発生したき裂の状況を調査した結果を Fig. 5.23, Fig. 5.24 に示す。AE イベントに



よる位置標定では、モニタ領域Ⅰとモニタ領域Ⅱとが同一の領域として取扱われるため、き裂の発生状況も、モニタ領域Ⅰとモニタ領域Ⅱとを重ね合わせる必要がある。Fig. 5.25は、トータルのAEイベントの分布図からイベント数の多いブロックを抜き出し、き裂の発生状況（モニタ領域Ⅰ+モニタ領域Ⅱ）と比較したものである。この図では、必ずしもき裂の発生箇所とAEイベントが多く発生しているブロックとの対応はとれてはいないが、上部胴と下部胴の溶接部に生じたき裂（モニタ領域内に発生したき裂では、このき裂が最大）の近傍から多数のAEイベントが発生していることがうかがえる。

AEイベントの分布を見ると、ほぼ全領域に発生しており、このことからAEイベントの発生要因としては、供試体に発生するき裂から生じるAE波のほか、供試体の温度変化に伴う熱膨張、熱収縮および内部流体（液体金属ナトリウム）の流体ノイズが考えられる。

従って、今後の課題としては、このような雑音からいかにしてAE信号を分離して取り扱うかということであり、真のAE信号を検知できれば、供試体の損傷の発生時点、発生位置ならびに損傷の度合をより高い確度で特定することが可能であると考えられる。

### 5.3 まとめ

- (1) 「原子炉容器モデル供試体」の熱過渡による損傷を監視するために、4チャンネルAE計測装置を用いて、1002サイクルの熱過渡試験時のAEデータを取得した。
- (2) 今回のAE計測は、本試験のような環境下でのAE計測がまったく未経験であったために、計測条件の設定に際して推定で条件設定を行わざるを得なかったが、AE計測の結果としては、熱過渡サイクル数700サイクル近傍でAEアクティビティが増加傾向を示しているのが確認された。これは、供試体の構造上に、き裂の発生あるいはき裂の進展速度の増大等、何らかの変化があったためと思われる。
- (3) AEイベントの位置標定結果では、き裂の発生箇所との対応は必ずしもとれなかったが、モニタ領域内で最も深いき裂の発生していた上部胴と下部胴の溶接部及びその近傍から多数のAEイベントの発生が確認できた。
- (4) 今後、AE計測を行うに当たりAE信号を雑音から分離して取り扱う技術が必要であり、これによりき裂の発生・進展に対応したAE信号をつかむことができれば、供試体の損傷の発生時点ならびに発生位置をより高い確度で特定することが可能である。

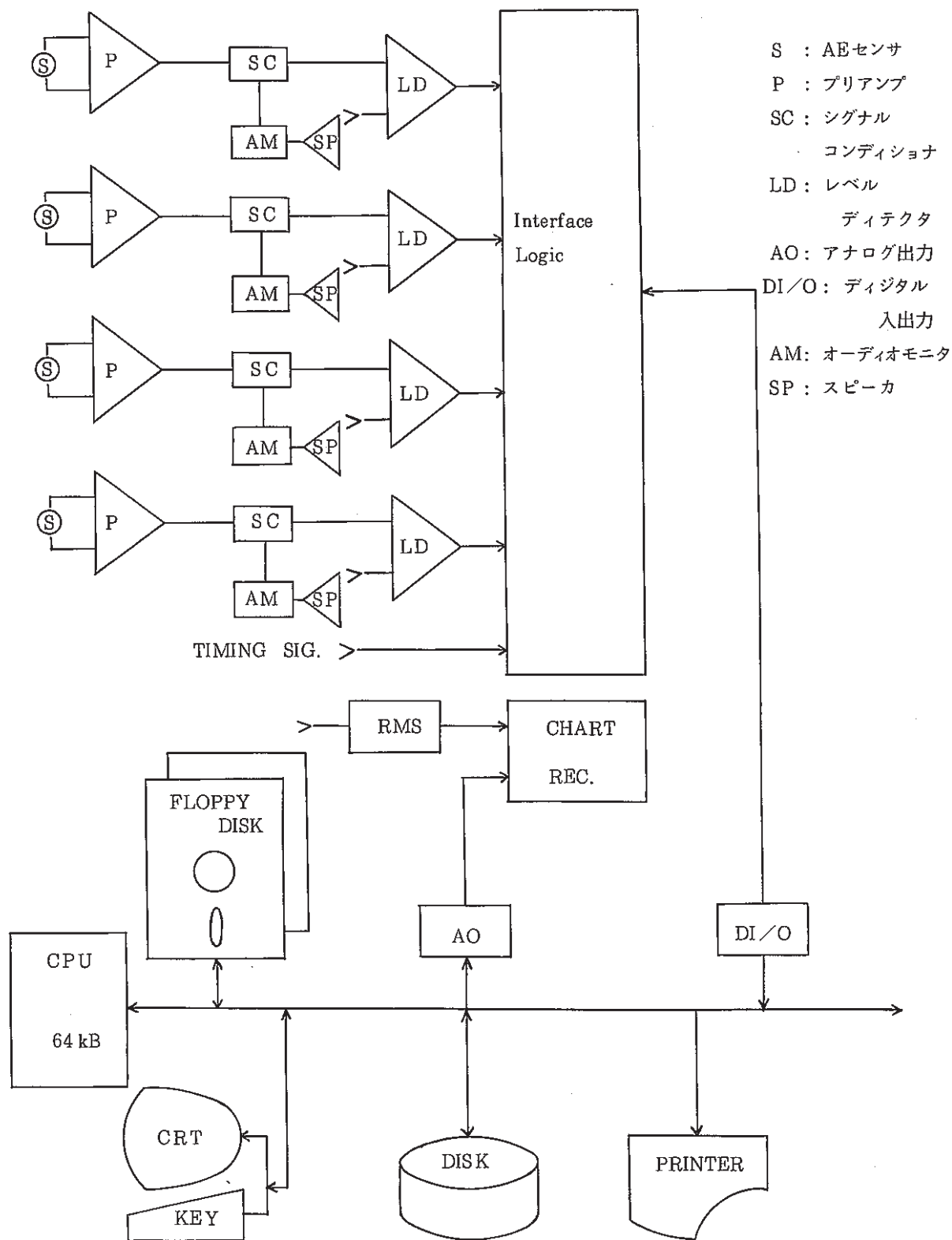


図 5.1 AE計測装置のブロックダイアグラム

Fig. 5.1 Block Diagram of AE measuring System

表 5.1 使用計測装置一覧表

Table 5.1 Specification of AE Signal measuring System

装 置 名	型 式 / 仕 様	メ ー カ
A E セ ン サ	404 AD / 差動型	富士セラミック
プ リ ア ン プ	/ 36 dB, 10 KHz ~ 2 MHz	
シグナルコンディショナ	NDT 251 / 0 ~ 30 dB, 100 KHz ~ 2 MHz	} NORTEC
レ ベ ル デ ィ テ ク タ	NDT 252 / 0 ~ 1 V	
オ ー デ ィ オ モ ニ タ	NDT 259	
コ ン ピ ュ ー タ	MP 200 / 16 Bit, 64 kB	} 日本データゼネラル
コ ン ソ ー ル	6052	
デ ィ ス ク	6105 / 25 MB (固定)	
フ ロ ッ ピ デ ィ ス ク	5986 B / 1.2 MB × 2	
プ リ ン タ	5911 IK / 150 cps	
デ ィ ジ タ ル 1 / 0	4222 / 16 Bit	
ア ナ ロ グ 出 力	4224 / ± 5 V, 2ch	
チャートレコーダ	MC 641 - 6 H / 6 ch	渡辺測器
R M S 電 圧 計	M 160 / true RMS	NF回路設計ブロック
オ シ ロ ス コ ー プ	5103 N / 4 ch	ソニーテクトロニクス
波 形 記 憶 装 置	SM 1300 / 4 kw × 2 ch	岩通電子

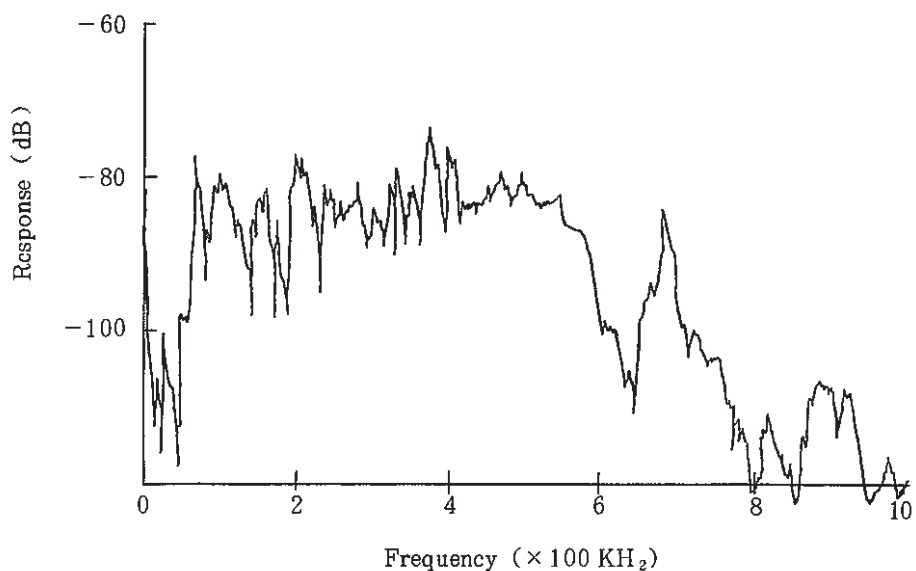


図 5.2 404 AD 型センサの周波数特性例

Fig.5.2 Example of Frequency-Sensitivity characteristics of Type 404 AD Sensor

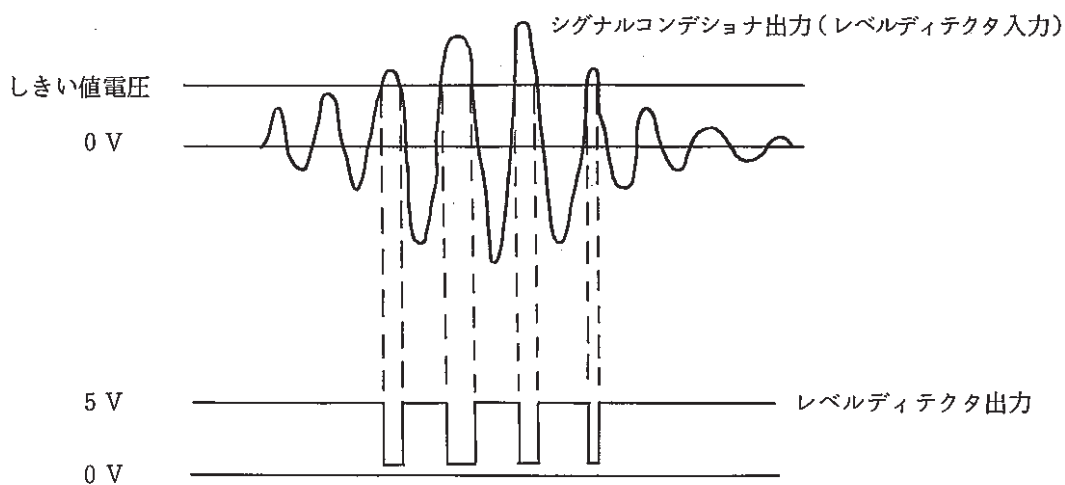


図 5.3 レベルディテクタの入力と出力との関係

Fig.5.3 Input and Output of Level Detector

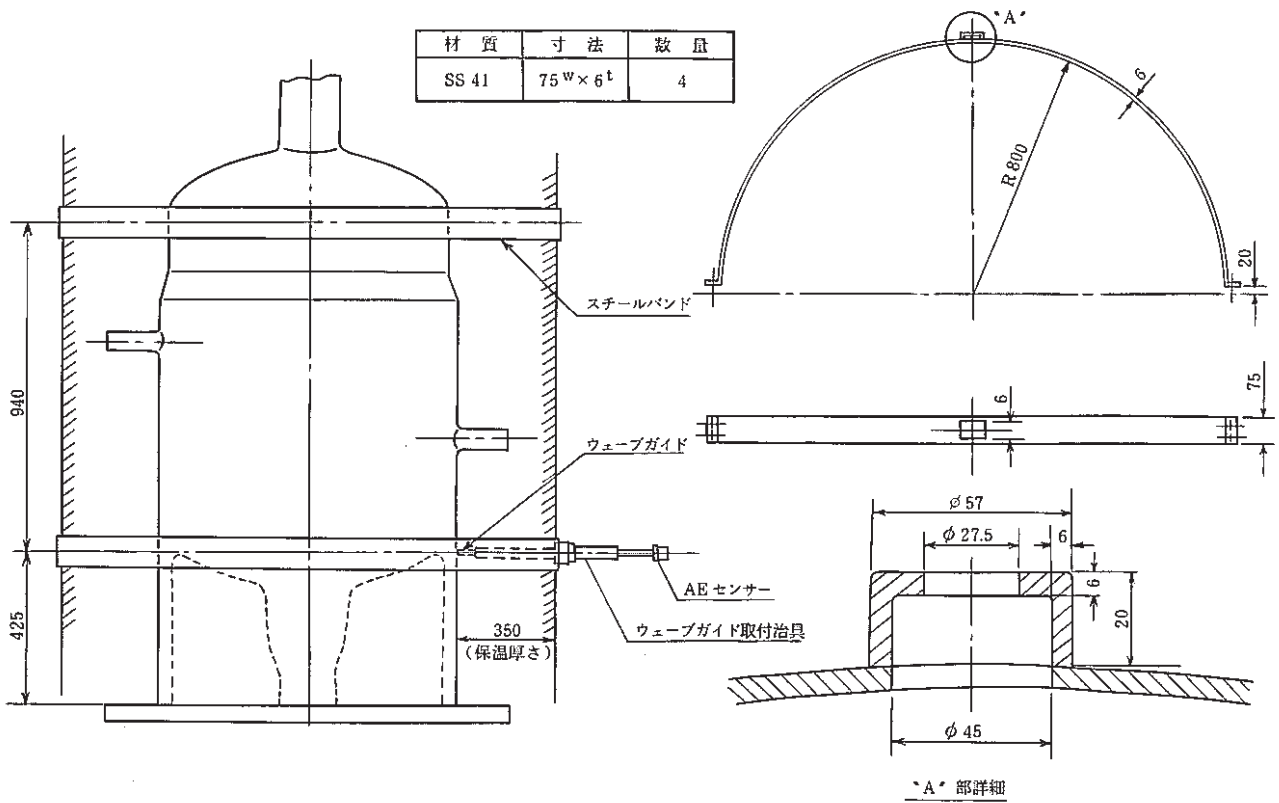


図 5.4 ウェーブガイド取付バンド

Fig. 5.4 Attachment Band of Wave Guide

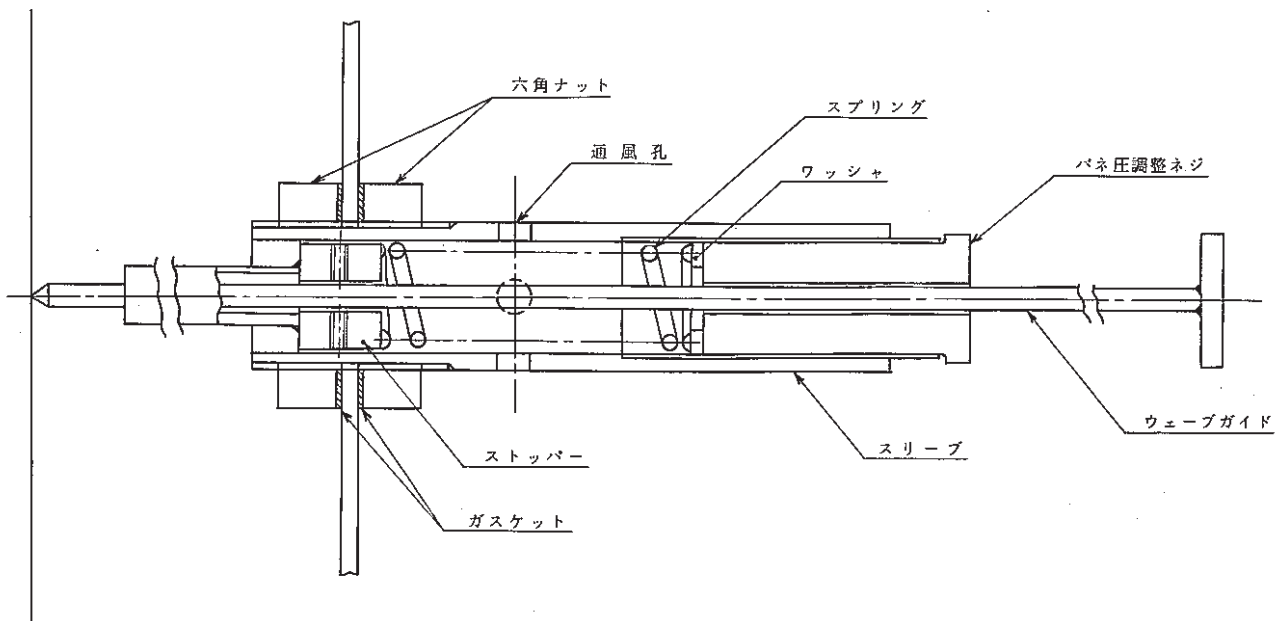


図 5.5 ウェーブガイド取付治具

Fig. 5.5 Attachment Tool of Wave Guide

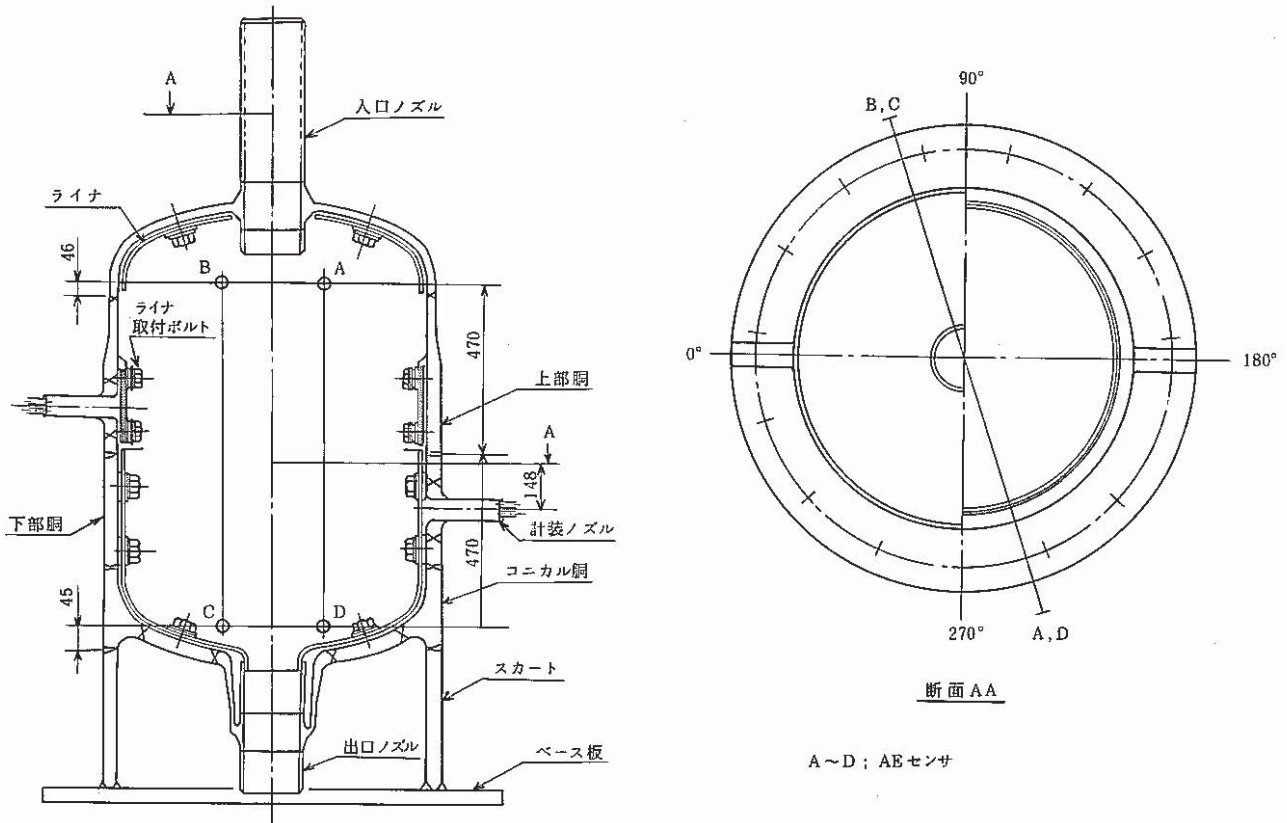


図 5.6 AEセンサ配置図

Fig. 5.6 Layout of AE Sensor

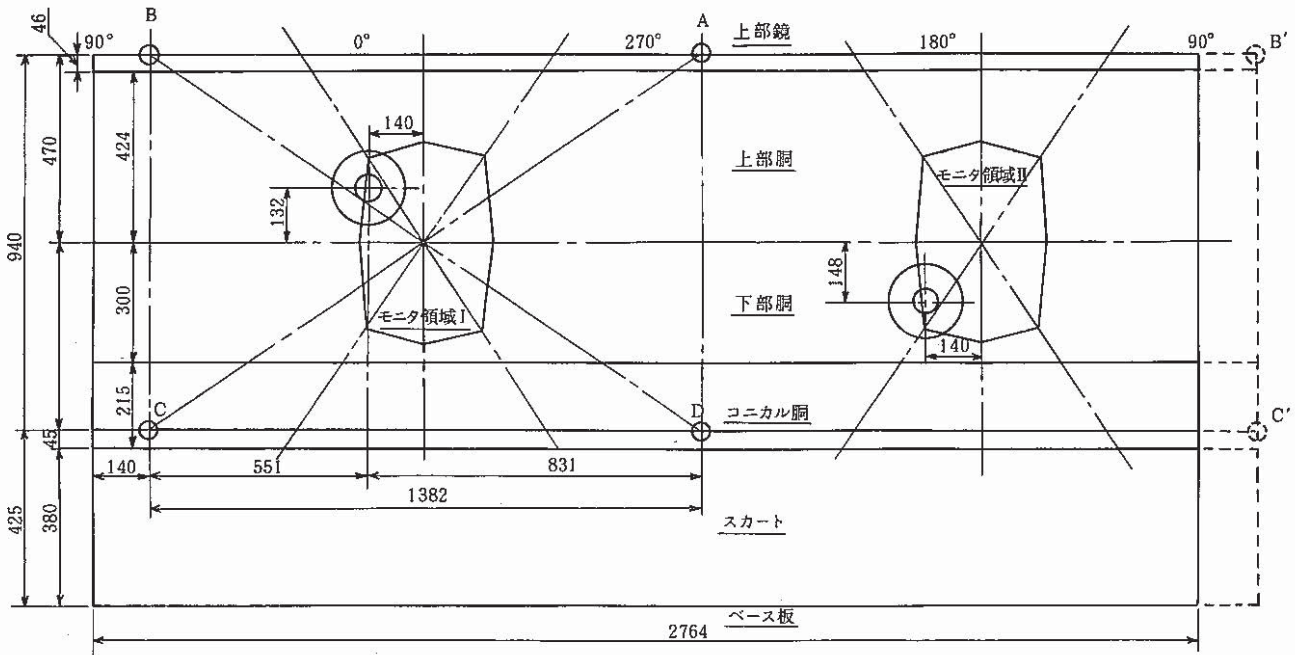


図 5.7 AEセンサ配置及びモニタ領域図

Fig. 5.7 Layout of AE Sensor and monitor Region

表 5.2 AE 計測条件

Table 5.2 Condition of AE measuring

項 目	条 件
チャンネル数	4
センサ	差動型, ウェーブガイド方式
位置標定方式	到着時間差計測方式 (最大時間差 99.9 $\mu$ S)
増幅器ゲイン	36 + 26 = 62 dB
フィルタ	100 KHzHPF ( - 36 dB/oct. )
しきい値電圧	0.15 V ( センサ出力換算 120 $\mu$ V )
イベント監視時間	1 ms
計測パラメタ	イベント数, 到着時間差 1, 到着時間差 2, 各チャンネルのイベントごとのリングダウンカウント, サイクル数, 位相
チャートレコーダ	10,000 イベント / フルスケール, 7.5 mm/hr

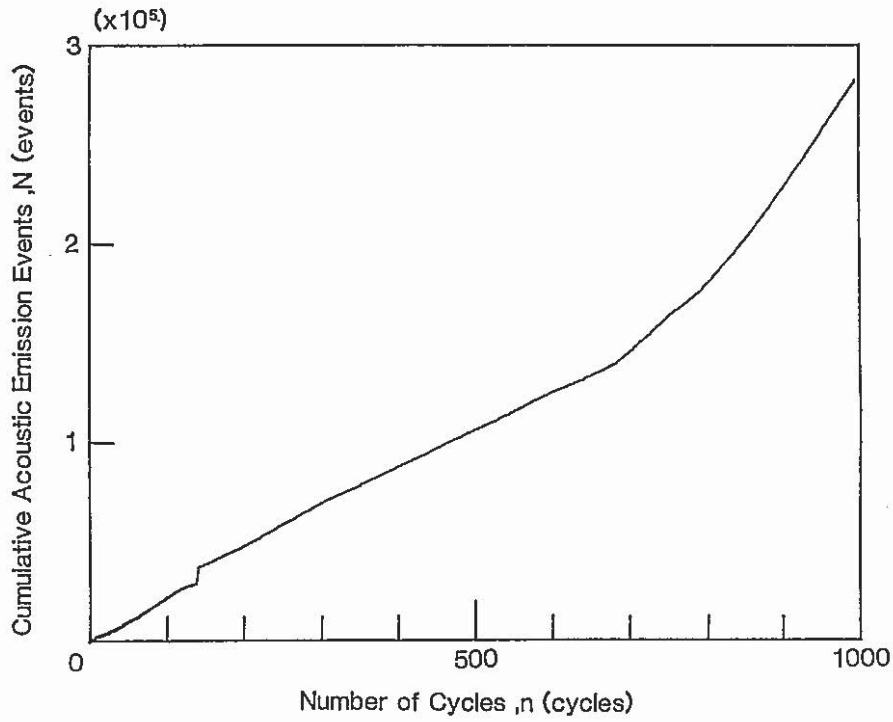


図 5.8 累積 AE イベント数と熱過渡サイクル数の関係

Fig. 5.8 Relation between Cumulative AE Event Counts and Number of Cycles

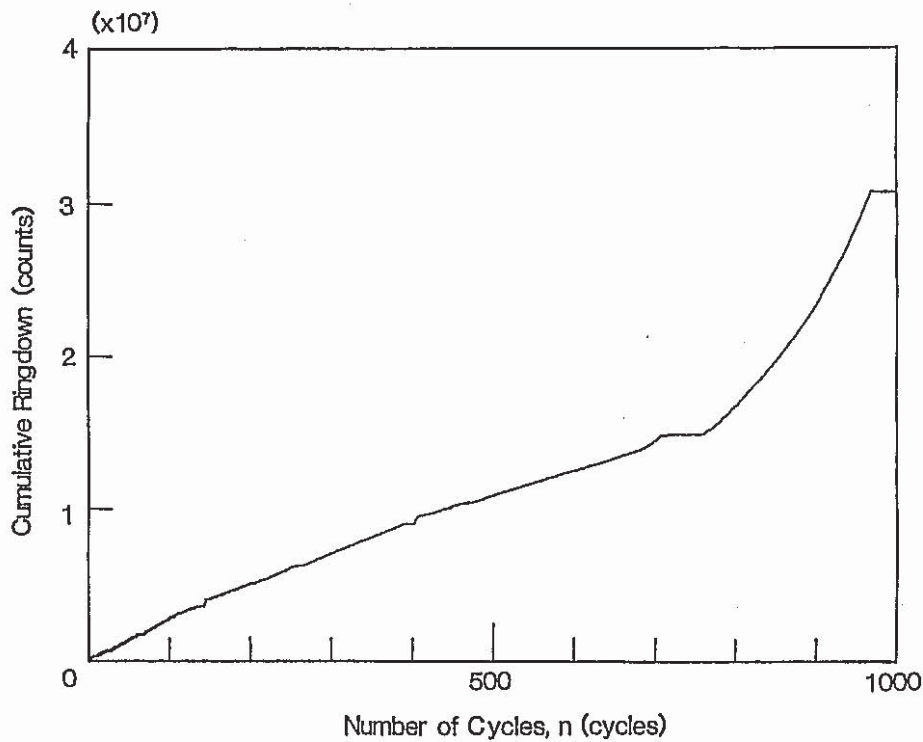


図 5.9 累積リングダウン数と熱過渡サイクル数の関係

Fig. 5.9 Relation between Cumulative Ringdown counts and Number of Cycles



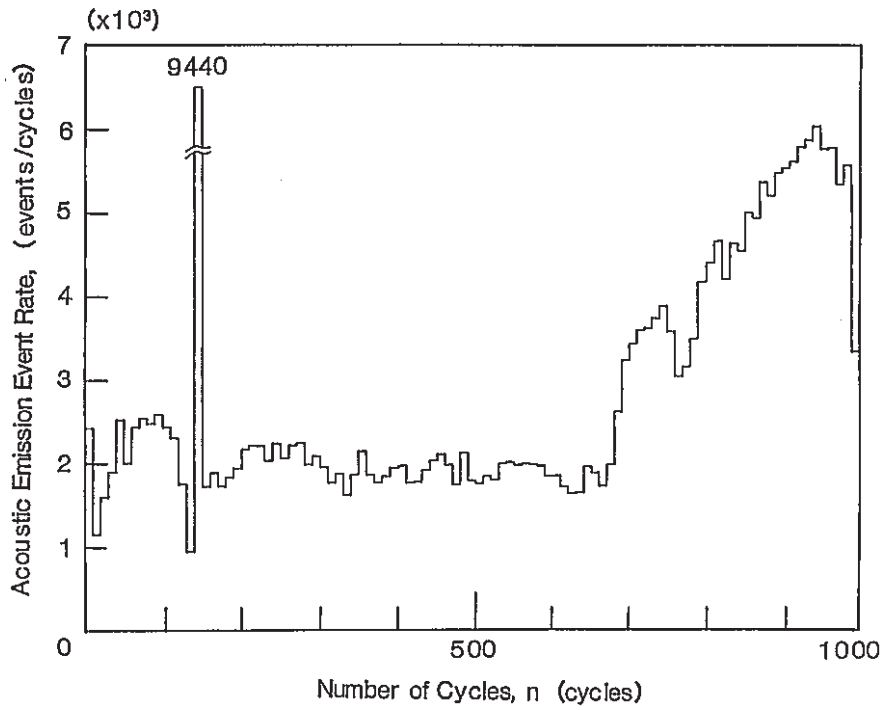


図 5.10 10 サイクルごとの AE イベント発生率と熱過渡サイクル数の関係  
Fig. 5.10 Relation of AE Event Rate and Number of Cycles

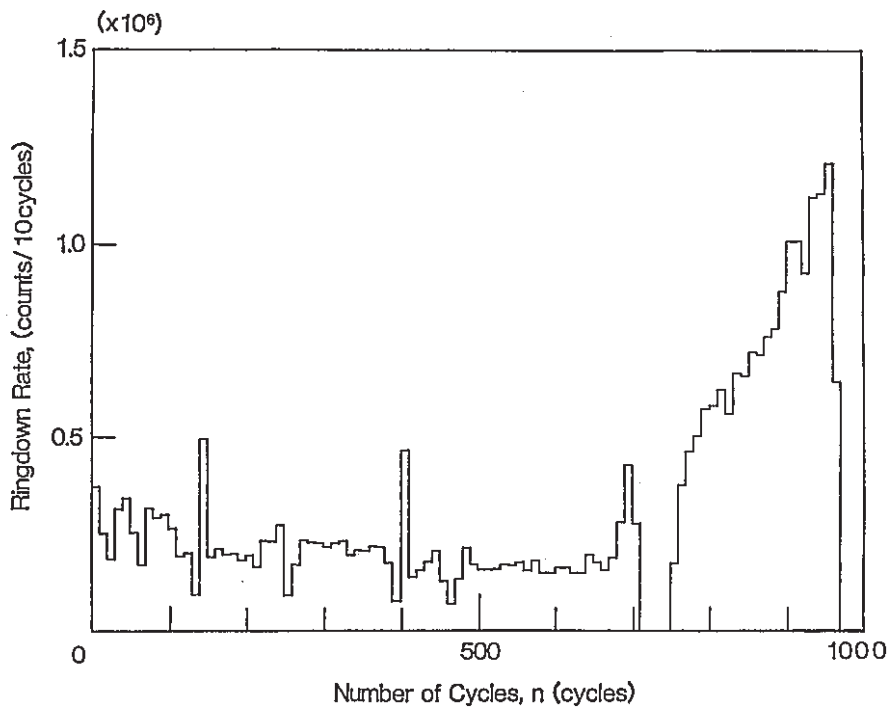


図 5.11 10 サイクルごとのリングダウン発生率と熱過渡サイクル数の関係  
Fig. 5.11 Relation of Ringdown Rate and Number of Cycles

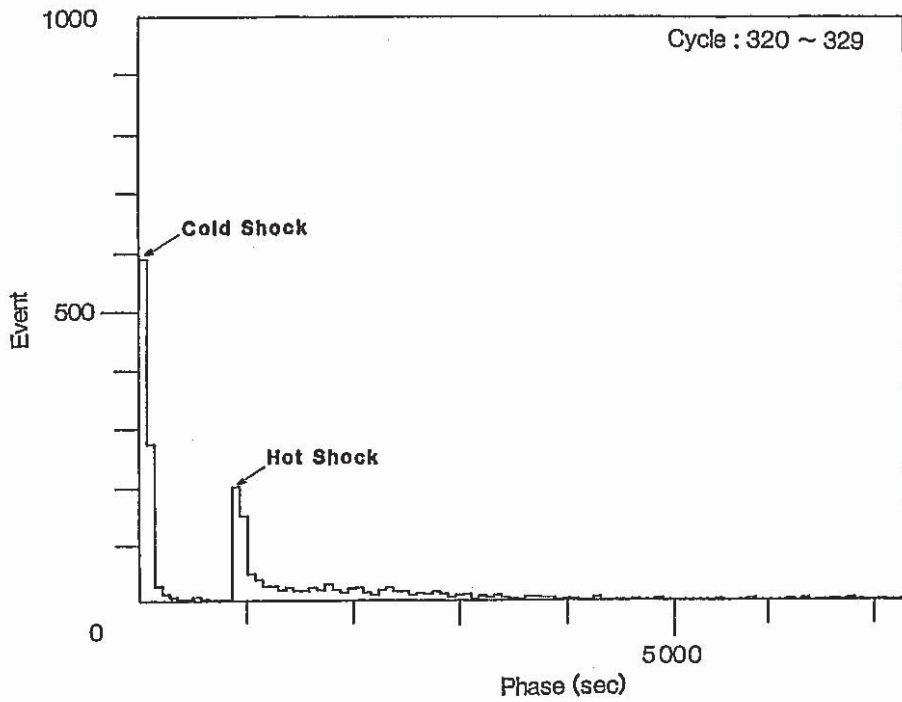


図 5.12 AE イベント数と AE 発生位相の相関 ( 320 ~ 329 サイクル )

Fig. 5.12 Correlation of AE Event Count and Phase ( 320 ~ 329 cycles )

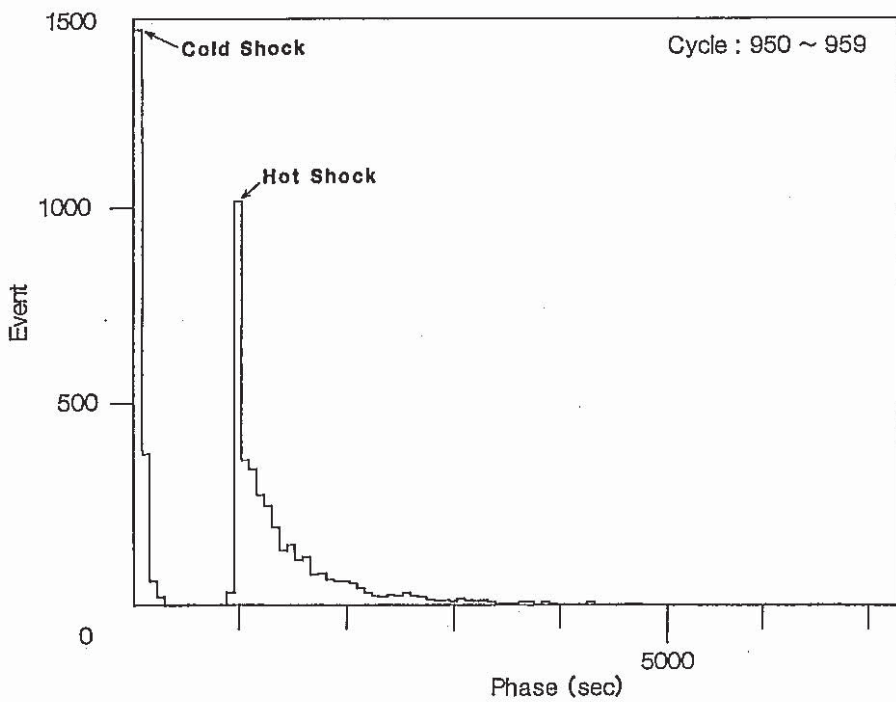


図 5.13 AE イベント数と AE 発生位相の相関 ( 950 ~ 959 サイクル )

Fig. 5.13 Correlation of AE Event Count and Phase ( 950 ~ 959 cycles )

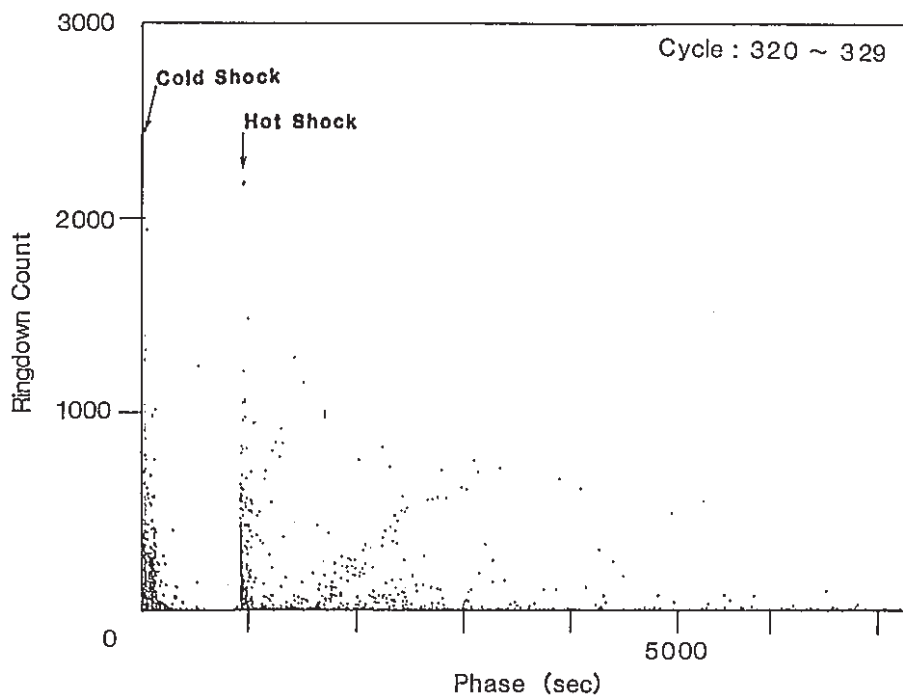


図 5.14 リングダウンカウントと AE 発生位相の相関 ( 320 ~ 329 サイクル )

Fig. 5.14 Correlation of Ringdown Count and Phase ( 320 ~ 329 cycles )

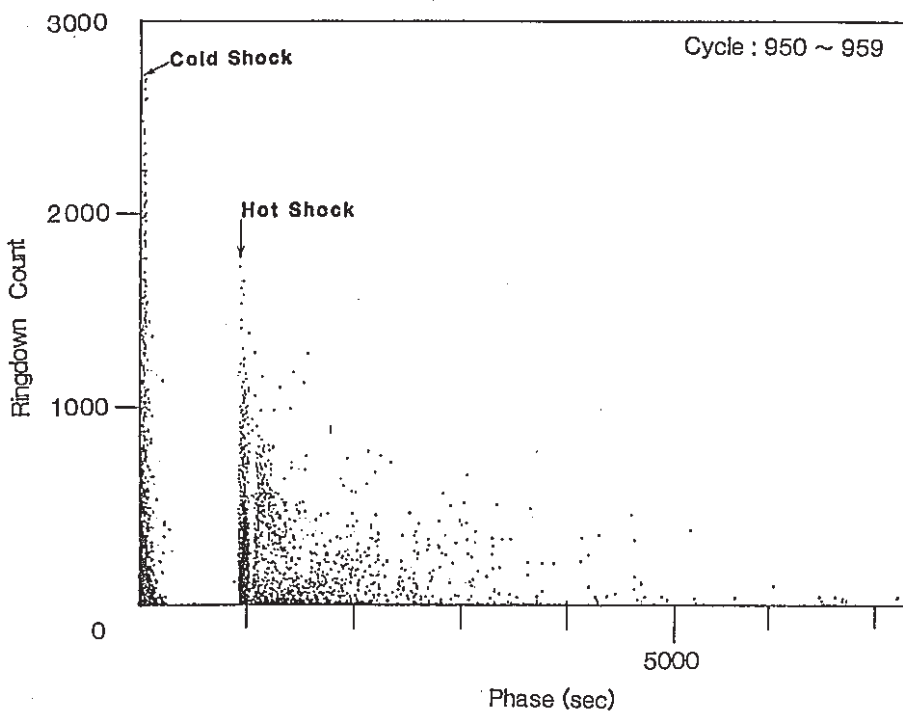


図 5.15 リングダウンカウントと AE 発生位相の相関 ( 950 ~ 959 サイクル )

Fig. 5.15 Correlation of Ringdown Count and Phase ( 950 ~ 959 cycles )

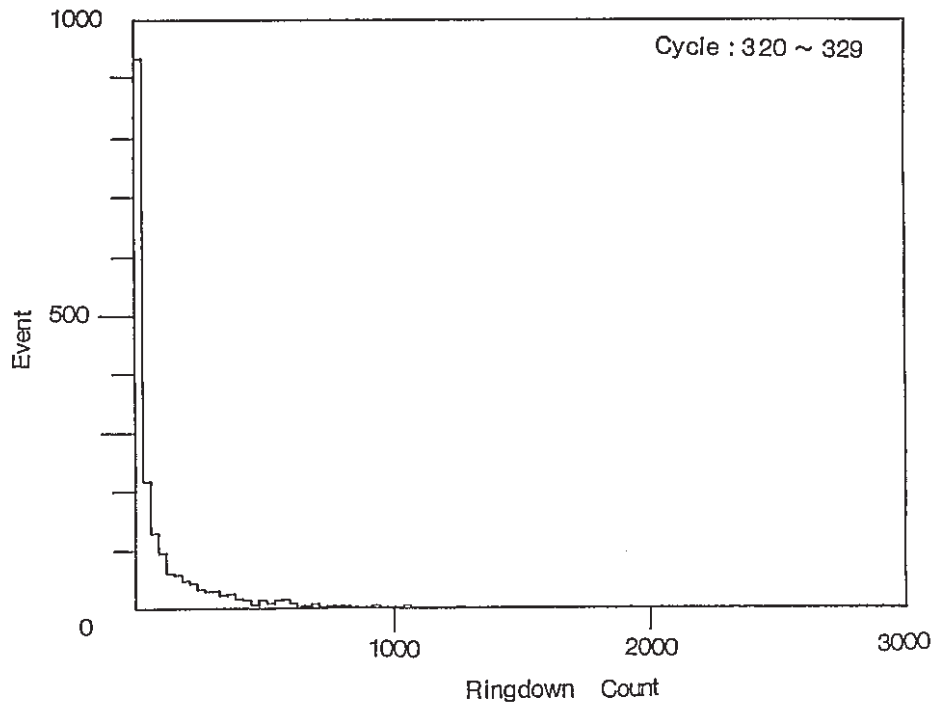


図 5.16 AE イベント数とリングダウンカウントの関係 ( 320 ~ 329 サイクル )

Fig. 5.16 Relation of AE Event Count and Ringdown Count ( 320 ~ 329 cycles )

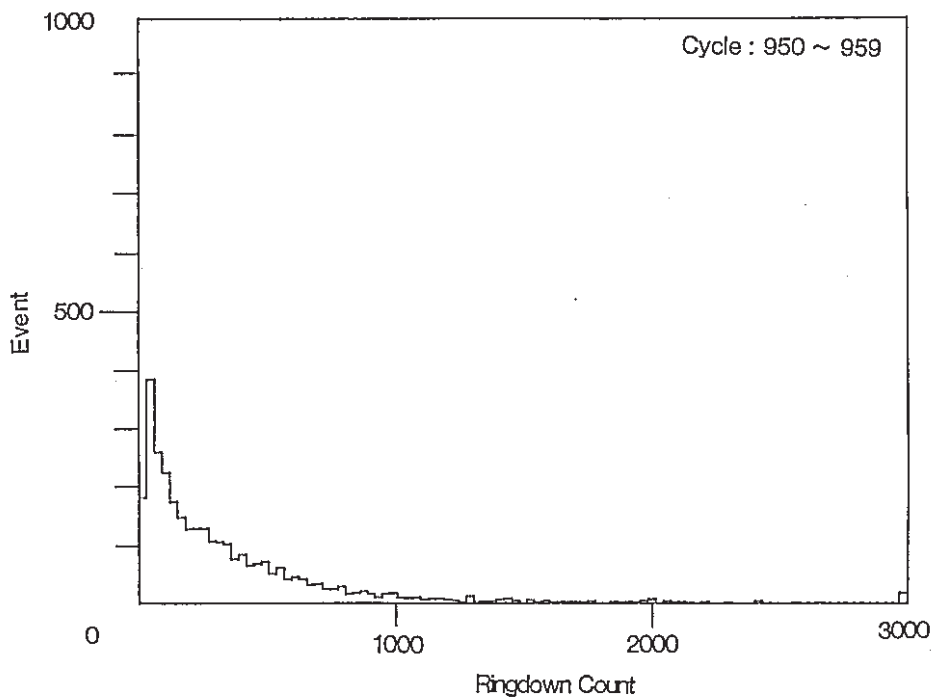


図 5.17 AE イベント数とリングダウンカウントの関係 ( 950 ~ 959 サイクル )

Fig. 5.17 Relation of AE Event Count and Ringdown Count ( 950 ~ 959 cycles )

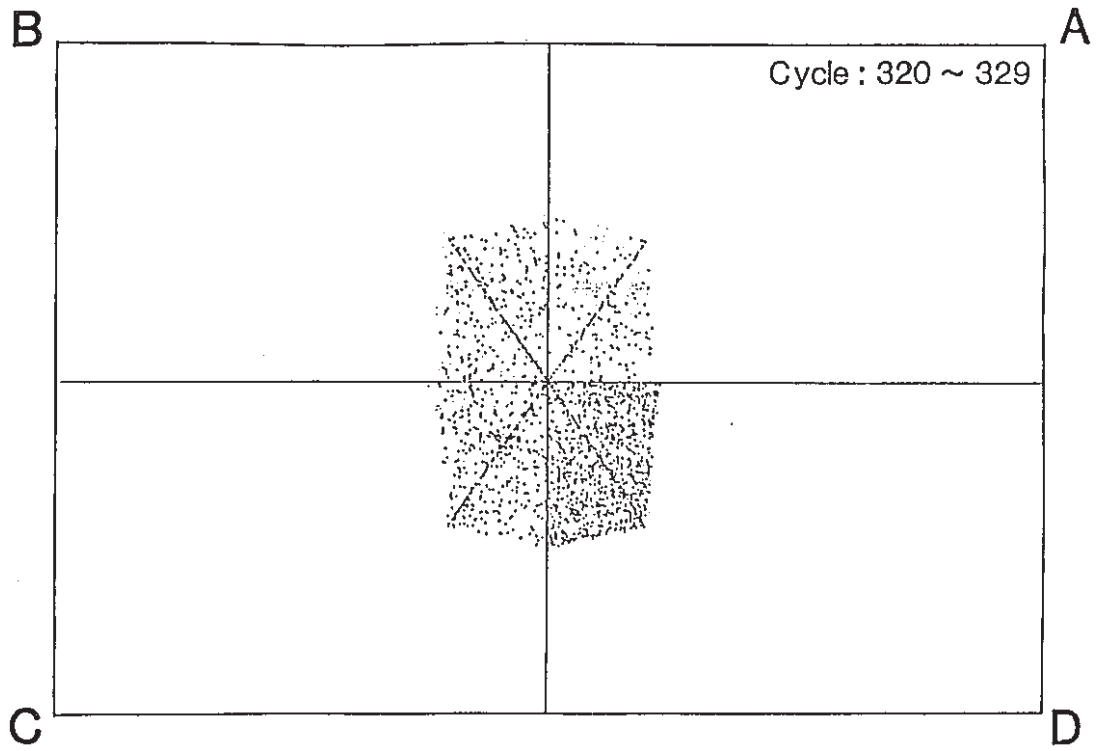


図 5.18 位置評定マップ ( 320 ~ 329 サイクル )

Fig. 5.18 Source Location ( 320 ~ 329 cycles )

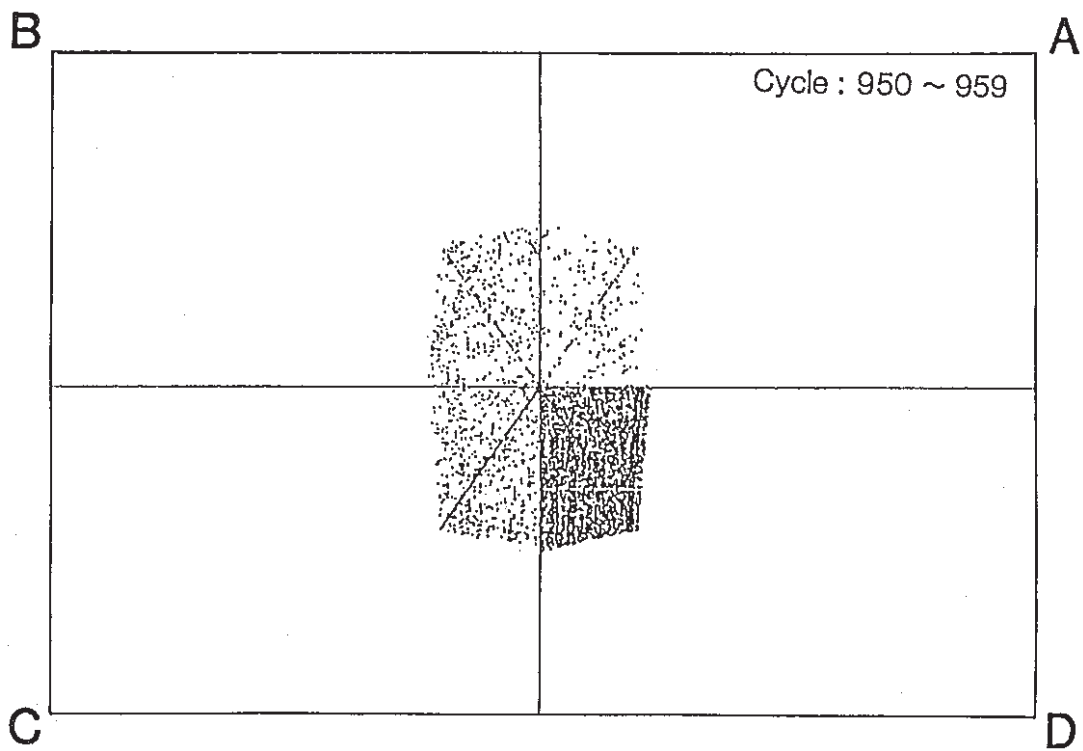


図 5.19 位置評定マップ ( 950 ~ 959 サイクル )

Fig. 5.19 Source Location ( 950 ~ 959 cycles )

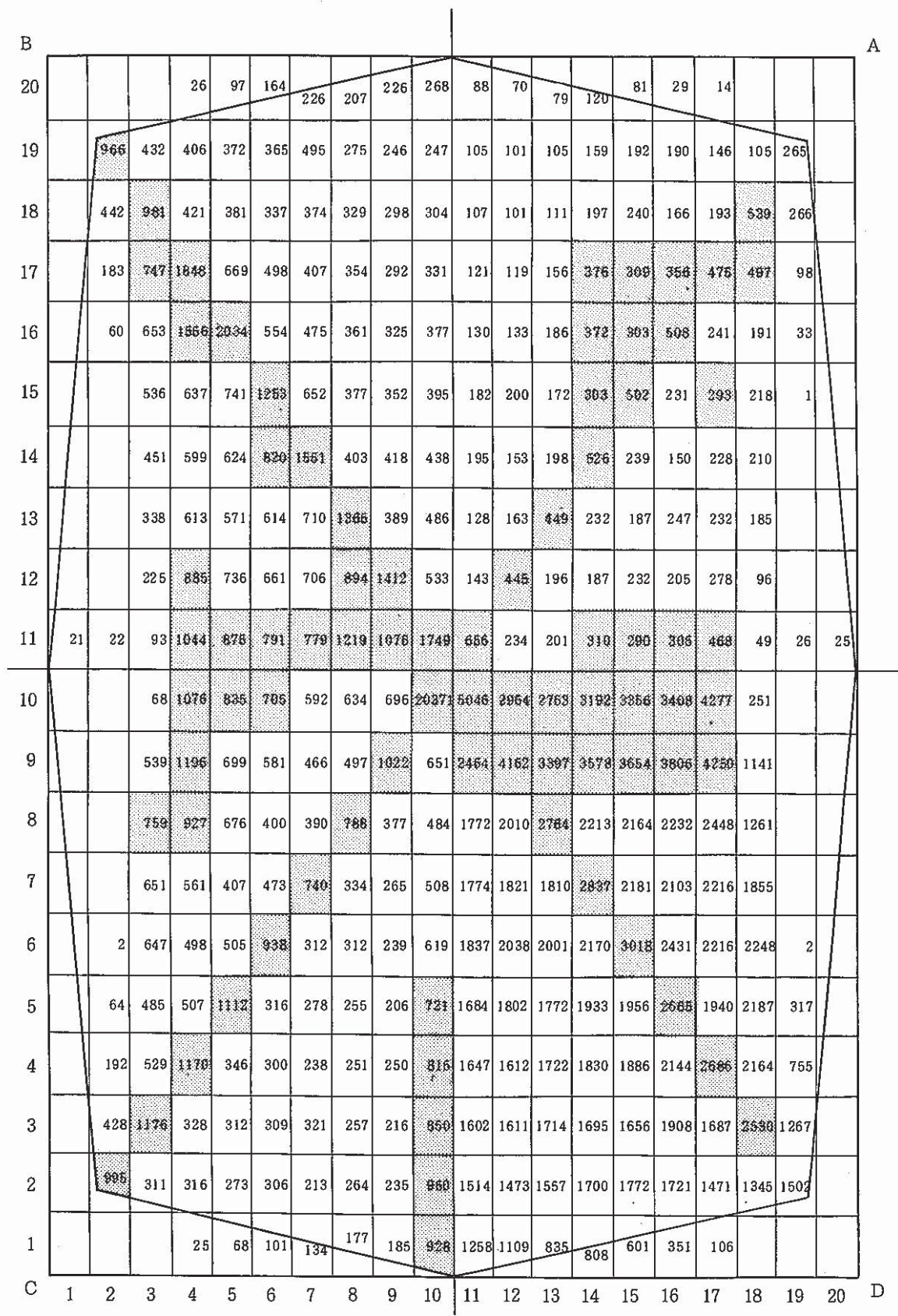


図 5.20 イベントカウントの分布図 (ホットショック+コールドショック)

Fig 5.20 Distribution of AE Event Count (Hot Shock + Cold Shock)

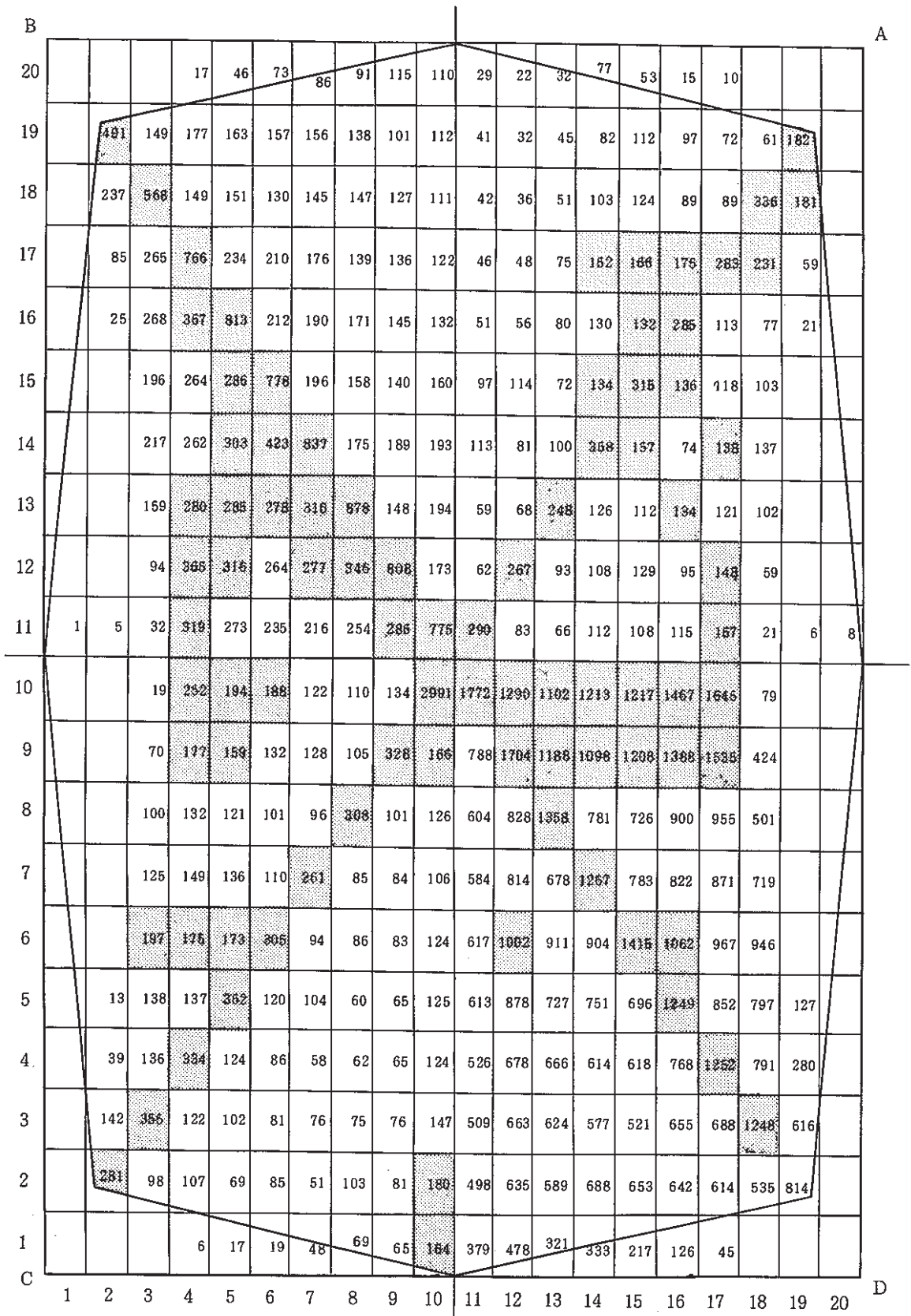


図 5.21 イベントカウントの分布図 (コールドショック)

Fig.5.21 Distribution of AE Event Count (Cold Shock)



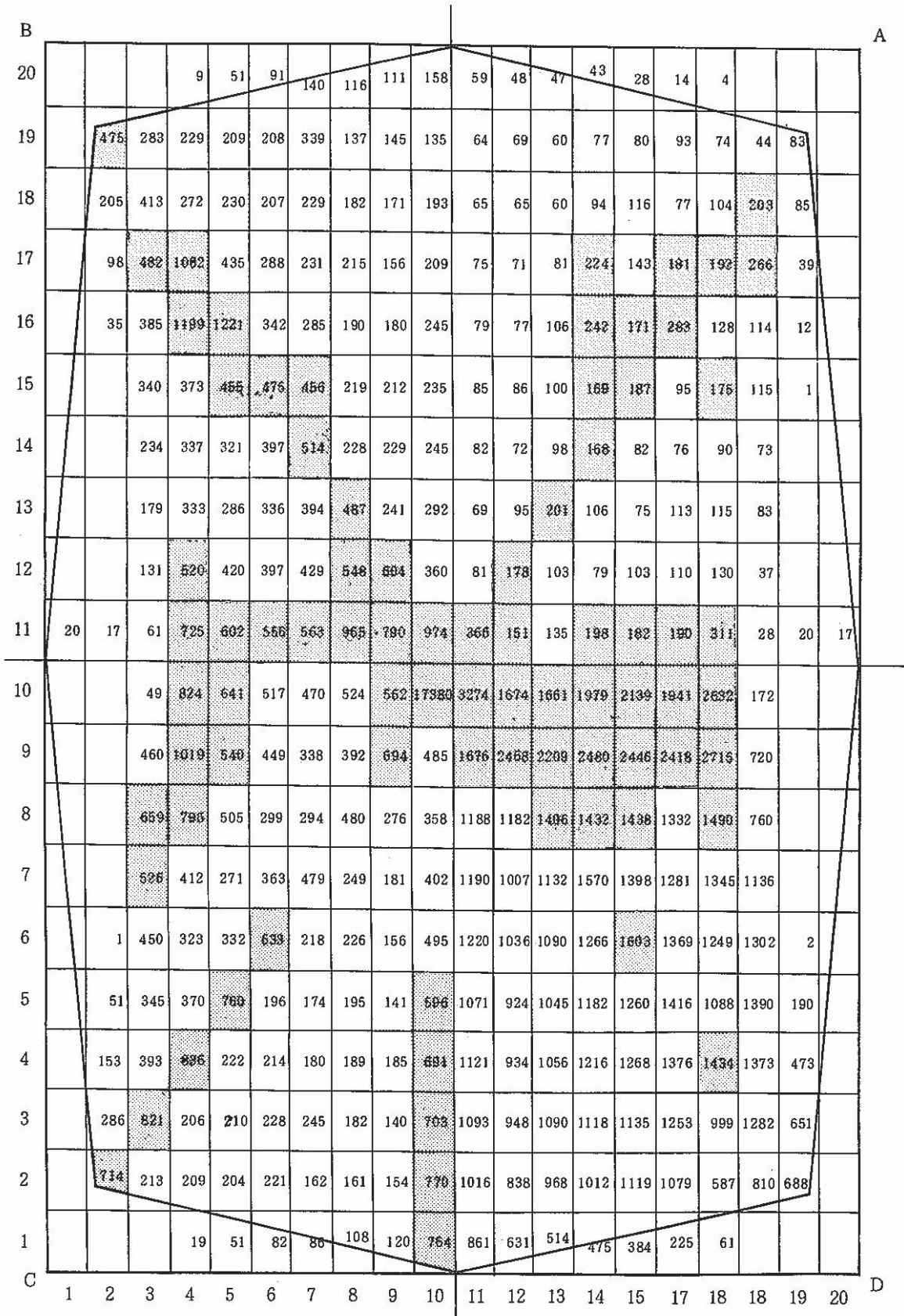


図 5.22 イベントカウントの分布図 (ホットショック)

Fig 5.22 Distribution of AE Event Count (Hot Shock)



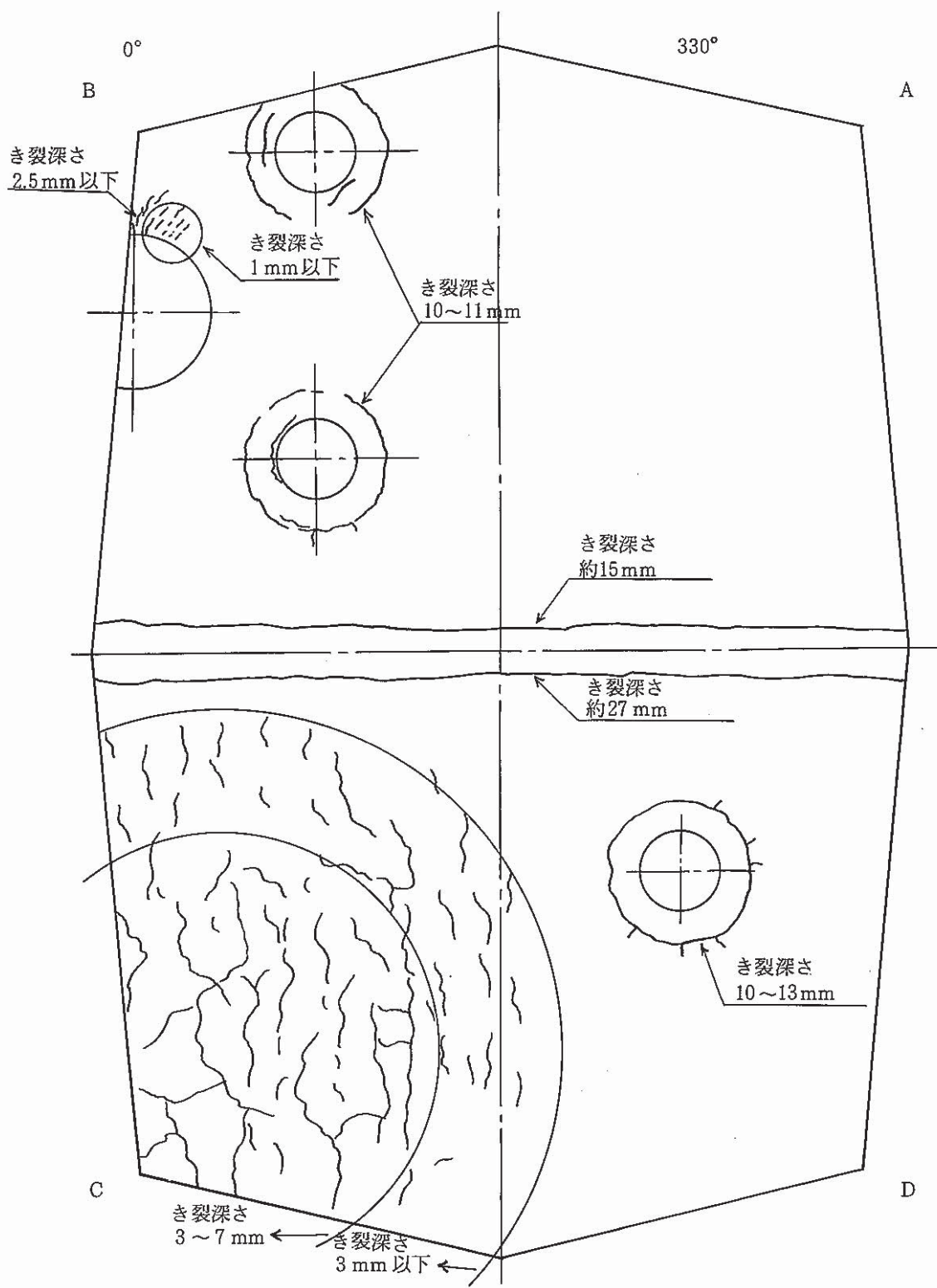


図 5.23 き裂発生状況 (モニタ領域 I)

Fig. 5.23 Crack Distribution (monitor Region I)

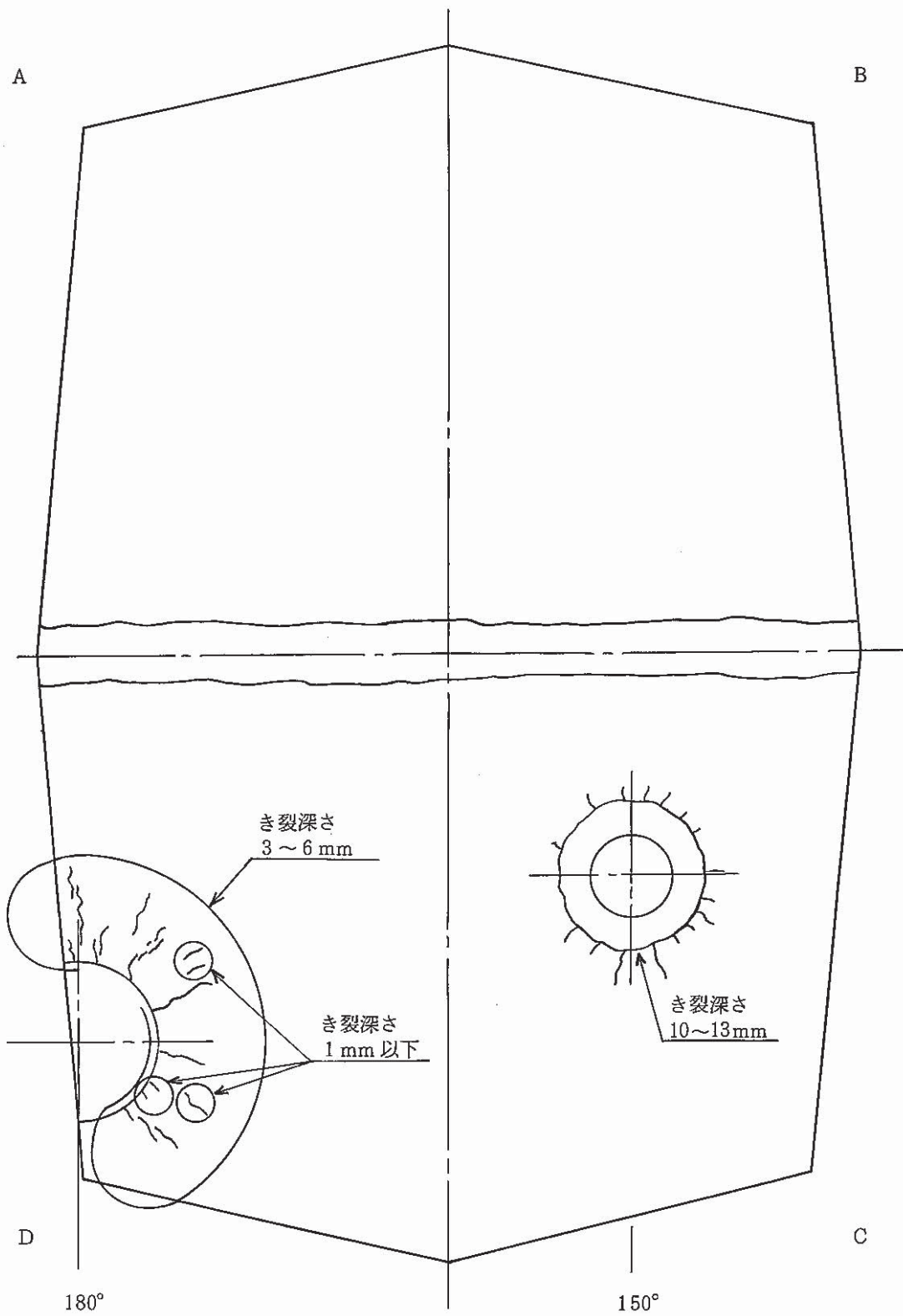


図 5.24 き裂発生状況 (モニタ領域 II)

Fig. 5.24 Crack Distribution (monitor Region II)

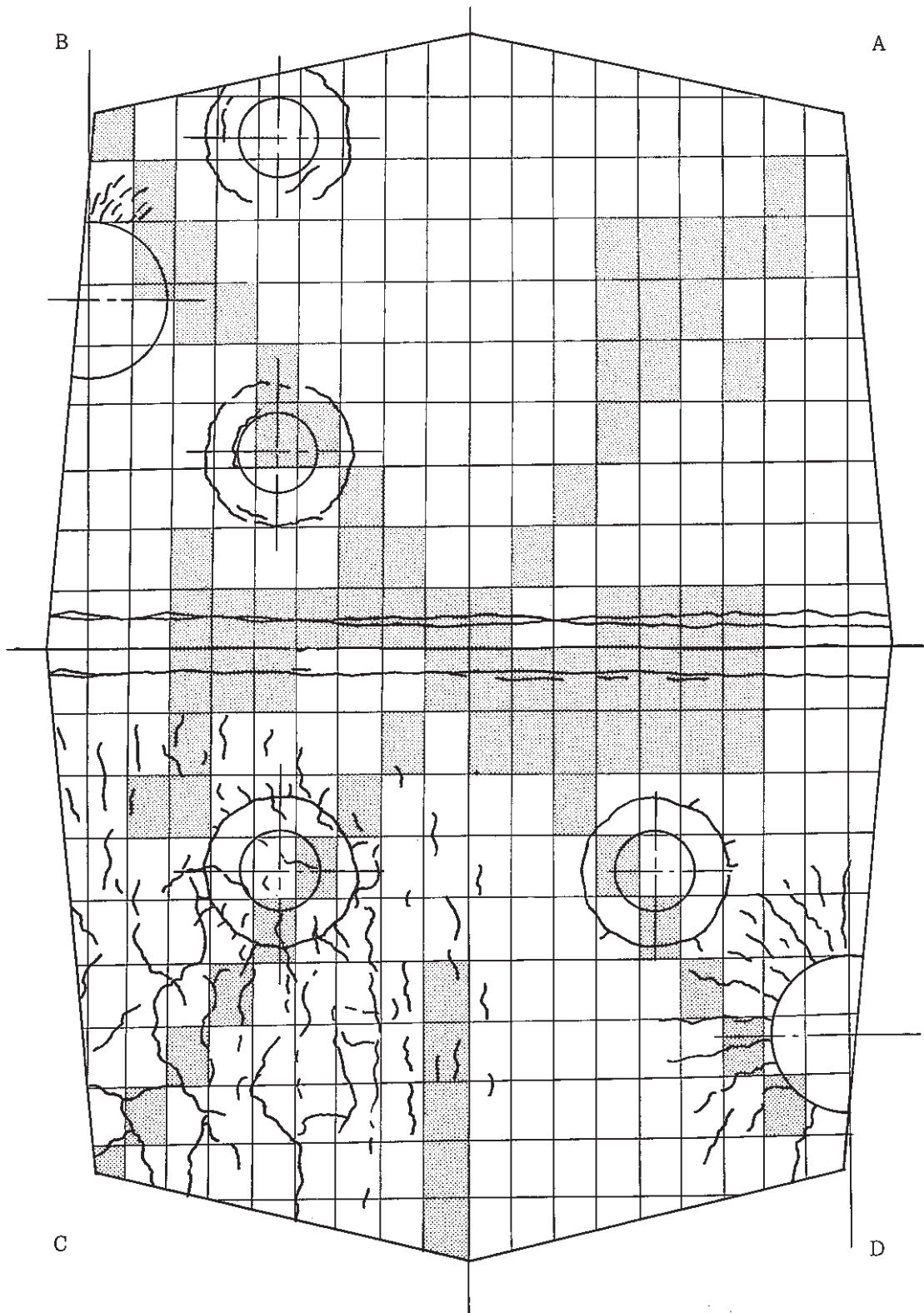


図 5.25 AE分布とき裂発生状況の比較図

Fig. 5.25 Comparison of AE Distribution and Crack Distribution

## 6. 結 論

構造物強度確性試験施設で原子炉容器モデル熱過渡強度試験用供試体のき裂の有無を検査する手段として超音波探傷（UT）とアコースティックエミッション（AE）計測を行った結果以下の結論を得た。

- (1) 供試体中に 200℃ のナトリウムが流動している状態で超音波探傷を実施し欠陥指示を確認することができた。

供試体を解体して PT 検査及びき裂の検査を行ったところ、欠陥指示に対応した場所にき裂が存在することを確認した。又、き裂の深さについては探傷精度はあまり良くなかった。以上から、高温超音波探傷法は溶接部を含む構造物にき裂があるのか無いのかを計測する手法として有効であることがわかった。

- (2) 4チャンネル AE 計測装置を用いて 1002 サイクルの熱過渡試験時の AE 計測を実施し 700 サイクル近傍で AE アクティビティが増加傾向を示すことを確認できた。また、AE 計測モニタ領域内で破面検査の結果最も深いき裂の発生していた上部胴と下部胴の溶接部及びその近傍から多数の AE イベントの発生が確認でき、AE を用いて構造物中のき裂の発生繰返し数と進展速度を計測できる可能性の高いことがわかった。

## 謝 辞

本試験の超音波探傷を担当した三菱重工業（株）高砂研究所電子技術総合研究室の榎並主任，アコースティックエミッション計測を担当した千代田化工建設（株）エンジニアリング本部の中野主査，他関係者各位に感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 遠藤 他：電磁超音波探傷技術の開発，PNC SJ922 84-03，1984年8月
- (2) 岸 他：高速炉の構造健全性評価へのアコースティック・エミッション（AE）法の適用性に関する研究（総合検討），PNC J 225 85-01，1985年2月

## 付 録

本報校正中に超音波探傷法の欠陥検出性に関するNRC ( Nuclear Regulatory Commission ) の報告書が入手できたので、その関連箇所を紹介して、本報で述べた超音波探傷技術の優秀性を述べたい。

NRCの報告書番号はNUREG/CR - 4469, Vol.1, 1986 ( Integration of Nondestructive Examination ( NDE ) Reliability and Fracture Mechanics ) であり、内容は供用期間中検査 ( ISI ) の現状技術の信頼性評価と信頼性の高いISI手法を開発するためにPacific Northwest Laboratory ( PNL ) に委託した成果報告の第1報である。研究対象は軽水炉の一次冷却系配管及び機器である。研究目的は次の通りである。

1. 軽水炉に対してUTによる信頼性の決定
2. 確率論的破壊力学を用いて、一次系の安全性に及ぼすNEDの非信頼度の影響を決めること、及び破損確率を適切に低くおさえるために必要な検査の信頼性のレベルを決めること。
3. NDE技術を改良し、それによって達成できる信頼性の改良度合を評価すること。
4. 材料特性、使用条件及びNED非信頼度に基づいて、破損確率を適切に低くおさえるために、ASME Sec. XI と政府規制の改良案を作成すること。

この研究は3つのBasic Task ( Piping Task, Pressure Vessel Task, Fracture Mechanics Task ) で構成されており、Piping Task 1としてPNLとWestinghouseとの協同研究で304ステンレス鋼のUT手探傷による検出限界試験が行われた。その結果熱疲労き裂と機械的な疲労き裂では検出限界が著しく違うことがわかった。即ち、板厚の5%~50%の深さの熱疲労き裂では検出確率が30%以下であったのに対し、板厚の20%の深さの機械荷重による疲労き裂では検出確率が80%であった。このことから、熱疲労き裂は現在のUT探傷技術では基本的には検出できないものであるとして、今後は探傷技術者を現実的なき裂で訓練すること、及び革新的な技術開発を提言している。

上記結果と比較して、本報で示した高温UT探傷の結果はき裂深さの検出精度はあまり良くなかったが、周方向及び軸方向の亀甲状き裂や全周にわたる周方向き裂は探傷できている。

今回のUT探傷を通じて言えることは、NRCの報告書の提言にもあるように、探傷対象であるき裂と同種のき裂で探傷訓練を行った後実際の探傷に入ることが重要であり、本報では原子炉容器モデルの前に実施した試運転用供試体の熱疲労き裂について探傷を行い訓練と同時に距離・振幅特性の較正を行ったことが重要である。

UTによる熱疲労き裂の探傷の現状はNRCの報告書が述べるようには必ずしも否定的ではなく、現象を理解した専門技術者が補助することによって探傷者はき裂をある程度適切に探傷できるものといえる。