

PNC IN941 77-112
CRIEPI 77002

発音検出法による高速増殖炉一次ナトリウム
冷却系配管の疲れ損傷過程の追跡法(第五報)

—ステンレス鋼ベンド管の
高温クリープ疲れ試験におけるAE計測—

共同研究報告

1977年10月

動力炉・核燃料開発事業団

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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

発音検出法による高速増殖炉一次ナトリウム
冷却系配管の疲れ損傷過程の追跡法(第五報)

——ステンレス鋼パイプの
高温クリープ疲れ試験におけるAE計測——

共同研究報告

報告者：電力中央研究所エネルギー・環境技術研究所

大野博敏 仲佐博裕

草薙秀雄 木村泰夫

報告者：動力炉・核燃料開発事業団高速炉安全性試験室

永田 敏 小林和裕*

今津 彰 程夫

報告者：高速炉開発本部

川口 悠* 田林邦夫

期間 1975年12月～1977年8月

目的 動力事業団と電力中央研究所との共同研究において、ステンレス鋼パイプのクリープ疲れ試験に対して、発音検出法によるクリープ疲れ損傷の追跡を行なった結果を報告する。

要旨

高速増殖炉「もんじゅ」を対象とした一次冷却系配管要素の各種損傷モードの加速損傷試験に対してAE法を適用し評価するための一環として、動力事業団と電力中央研究所は共同研究体制下において昭和51年3月に実施されたSUS 304 ステンレス鋼パイプの高温クリープ疲れ試験にAE計測を行った。本報告はそのクリープ疲れ試験およびAE適用評価試験の結果を取りまとめたものであり、定常クリープ疲れ試験過程におけるAE特性の解析およびその試験過程の状況で得られたAE評価結果から導かれたAE法の欠陥検知能の評価の結果を述べている。

* 現在 非核燃料技術研究所

** 現在 三菱重工業株式会社

Application of Acoustic Emission Techniques to a Creep-Fatigue Test
of a Type 304 Stainless Steel Elbow Component

FNC

Masao Etori, Akira Imazu,
Takashi Nagata, and Kazuhiro Kobayashi
Osamu Kawaguchi, Kumi Okabayashi

CRIEPI

Hironori Ohno, Hiroyasu Nakasa,
Hideo Kusanagi, and Hideo Kimura

Abstract

This paper presents the cooperative work by PNC and CRIEPI on the AE application to a creep-fatigue test of a Type 304 long elbow test assembly, that is, almost the 1/2-scale model of the primary coolant piping component of the proto-type FBR "MONJU". The creep-fatigue test was performed in air at 600°C with the displacement-controlled in-plane bending load. AE characteristics, such as ring-down count rates, signal waveforms, peak-amplitude distributions and signal location patterns, were analyzed in the process of the stationary creep-fatigue loading and the special loading for evaluating the effectiveness of AET to detect the piping defects.

目 次

1. 序	1
2. 空气中クリープ疲れ試験	2
2.1 概要	2
2.2 供試体	2
2.3 試験装置および試験方法	2
2.4 試験経過および結果	3
3. AE計測方法	5
3.1 AE素機子とその取付け方法	5
3.2 信号処理方法	5
3.3 AE特性解析方法	6
4. AE計測結果およびその評価	8
4.1 定常クリープ疲れ試験	8
4.2 AE有効性評価試験	9
5. 結び	11
参考文献	13

2. 空気中クリープ破れ試験

2.1 概要

高速原型炉「もんじゅ」の一次冷却系ホットレグ配管領域では、構造材料のクリープ特性が無視できなくなる。材料のクリープ特性に起因する設計上の問題点の一つに「クリープ破れ相互作用」がある。これは、材料の破れ寿命がクリープとの相互作用によって低下する現象であり、とくに繰返し負荷応力の周期が長い場合や保持時間のある場合には顕著に見られる。実験ではプラントの起動と停止に伴う熱膨張応力の繰返しがこの破損モードに対応し、この現象の十分な理解はプラントの安全性確保の上で最も重要な課題の一つとなっている。

このため、一次冷却系配管要素の1/2モデルにこのようなクリープ破れ相互作用による損傷を実験的に生じさせ、破損状況の把握と寿命評価を行うことを目的とした空気中クリープ破れ試験を実施することになった。供試体はSUS304ステンレス鋼製Sch.20Sの90°ロングエルボ（外径318.5mm、公称板厚6.5mm）の両端にそれぞれ1.5428mmと1.037.8mmの直管（SUS304, Sch.20S）を溶接したものである。これを600°Cに昇温し、短かい方の直管の先端に変位量±30mm（最大ひずみ範囲約6000μ）、エルボを強く曲げる変位ピークで100秒間の保持時間をもつ成形液を繰返し印加し、変れき型がエルボの板厚を貫通するまでのクリープ破れ試験を行った。なお、本報告で述べる試験はBE-202試験と呼ばれ、第2回目の空気中クリープ破れ試験であり、昭和51年3月に実施された。また、これに先立つ昭和50年12月には第1回試験（BE-201）が行なわれており、両者の試験条件の相異点は、100秒間保持の変位ピークが第1回試験ではエルボを閉じる側になっている点のみの差である。

2.2 供試体

図2.1に供試体形状および内装電気ヒータの構造を示す。また、供試体のクリープ破れ試験（CFT）状況を写真1に示す。供試体はSUS304製12B, Sch.20Sの90°ロングエルボの両端に同種同厚の直管を溶接したものである。このエルボの製作は、材料の板厚は、冷間にてU型に成形したものを、θ=0°と180°に沿って溶接し、ピード仕上げ等体化熱処理を施す手順によった。溶接部については、内装試験、染色腐蝕試験およびX線透過試験を行ない、欠陥のないことが確認されている。表2.1に、供試体材料の機械的性質および化学組成を示す。

2.3 試験装置および試験方法

図2.2に試験装置の全体図を示す。供試体の一端を試験フレームに固定し、他端に電動油圧ジャッキを取付けてある。ジャッキは最大±10tonの負荷能力を持ち、制動装置によって変位また

は荷重を制御量として任意の波長の繰返し負荷を供試体に与えることができるようになっている。本試験では、変位制御で三角波または正弦波またははエルボを閉く側で保持時間のある台形波の負荷を与えている。

供試体内面に組込まれた電気ヒータは、図2.1に示したように8個のブロックから構成されており、それぞれ独立にon-off制御して供試体の温度分布を一様化できるようにしている。

- (1) クリープ破れ試験におけるA/E計測系を除く測定量は次の通りである。
- (2) Aillet社社製高周ひずみゲージSG425による供試体外面の主要位置のひずみ
- (3) 動態変位により測定された図2.3に示すような断面変形計測器具によるφ=0°のエルボ断面変形

- (3) 熱電対による温度分布
- (4) 供試体先端の荷重と変位

これらの測定値はデータ収録装置によって最小0.1秒のサンプリング間隔で磁気テープに記録される。上記(1)、(2)および(3)の各種測定器の供試体への取付け配置図を図2.4に示す。なお、最終的なき裂進展の測定は、供試体内に約1Kg/cm²の空気圧を負荷し、その減少を検出することによって行なう。

2.4 試験経過および結果

表2.2に、本試験CFT-BE-202の試験経過を示す。また、同表中に示されている次の諸量の説明図を図2.5に示す。

- (1) 供試体先端の正負符号（注1）
 - (2) 油圧ジャッキの起動方向（注2）
 - (3) 台形変位荷重形状1サイクル毎の各ステップの時間t₁, t₂, t₃（注3）
- BE-202試験は昭和51年3月2日の室温における静的および動的試験から始まった。その後に直ちに昇温を開始し、3月4日まで、図2.5に示すような各ヒータブロックの設定温度により600±5°Cの安定な供試体の温度分布が得られた。
- 定常サイクル試験に先立って、11種類の異なる負荷パターン（いずれも面内曲げ、変位制御）による動的試験を行なった。その際の主な結果は次の通りである。

- (1) 荷重範囲は負荷サイクルと共に増大した。
- (2) この荷重範囲の拡大は繰返し硬化によるものと考えられるが、試験の中断によって部分的には短時間の中に回復した。
- (3) 変位保持の間に応力緩和現象で荷重とひずみが減少した。その減少量は、繰返し硬化により負荷サイクルと共に小さくなった。
- (4) 最大ひずみ発生点におけるひずみ範囲も負荷サイクルと共に減少し、またその平均値の移動が見られた。

クリープ破れ試験の定常サイクルは3月8日から開始し、先端変位±30mm、相上げ側で100秒間保持の加振波形を破れき裂の貫通3810サイクルまで繰返した。なお、1000サイクルの時点で、ひずみゲージの貼替えのため試験を中断し、温度を室温に降している。その際には、温度変化による供試体先端の変位を拘束せずに常に荷重が零となるようにした。

図2.7および図2.8に定常サイクル初期における荷重とひずみの時間変化および先端変位と荷重の関係を示す。また、図2.9にエルゴ中央部の断面変形分布を示す。

1000サイクルの加振再開後は供試体内に約1Kg/cm²Gの空気圧を強りき型の重直を監視した。約3000サイクル付近よりA Eの計数率が徐々に増加し、その後3700サイクルを過ぎた頃から急増した。このため3806サイクルにて定常サイクル試験を中止し、空気圧減少量を調べた。その結果、僅少な空気圧減少が認められたので、3806サイクルにて計測を終了した。

以上の定常サイクルにおける荷重ピークの変化と代表的サイクルでの荷重-変位ヒステリシスとをそれぞれ図2.10と図2.11に示す。両図には、上記の初期動的試験で得られたのと類似な結果が見られる。

なお、先端変位±30mmで片側100秒間保持の台形波負荷による定常サイクルの試験過程において1日1回の割合で試験一時停止し、次のようなA E特性測定用の小変位三角波運動の繰返し試験を実施した。

- (1) 先端変位: ±5mm
- (2) 変位波形: T₁ = 3.0秒の三角波
- (3) 繰返し数: 最小5サイクル×4
- (4) 実施時の定常サイクル数 (月/日):
 - ① 0c (3/5, 3/8)定常試験前
 - ② 1.000c (3/9, 3/10)試験前と昇温後
 - ③ 1.700c (3/11)
 - ④ 2.330c (3/12)
 - ⑤ 3.000c (3/13)
 - ⑥ 3.806c (3/14)クリーク確認時

以上の試験はクリープ破れ破損の増進段階でのA E特性を調べるために、A E計測に適した負荷条件として実施したものである。

き裂貫通によるエアリーク確認後確認し、保護材を除去して供試体の表面を観察した結果、θ = 0°、θ = 90°付近に長さ約70mmの軸方向き裂が確認された。それ以外にもいくつかの微小き裂が付近に発生していたと共に、反対側θ = 270°付近にも微小き裂がいくつか確認された。

3. A E 計測方法

3.1 A E 変換子とその取付け方法

本試験BE-202においては、前回のBE-201試験の経験とこれまで実施した多くのベンチの曲げ破れ試験の結果とによって、変換子領域はエルゴ中央の増設部であることが予想された。このため、変換子領域になるべく近接した位置に設置した主要変換子Mについて種々のA E特性を詳細に調べることと、最少数の副A E変換子によって変換子領域からのA E信号の発生位置を特定すること、を目的としてA E変換子の選択とそれらの配列決定を行った。

高温試験時のA E信号レベルは高くなることとこれまでの経験から判断している⁶⁾ので、使用するA E変換子はとくに高感度であることの必要性はなく、むしろ広帯域型のものがA E信号の波形と周波数成分の測定に適切である。この理由から、A E変換子はすべてDunegan/Endevco社製のS9201型広帯域変換子を使用することにした。このため、その室温用のA E変換子の供試体への取付けは、室温試験であるので導波棒方式によることとした。図3.1にA E変換子の導波棒への取付け法、また、図3.2に導波棒付A E変換子はA E変換子への配列図を示す。図3.2においてA、B、CおよびDの記号を付したA E変換子はA E変換子領域定用のものであり、MおよびSの記号を付したA E変換子はそれぞれマスター(主)およびスレーブ(副)変換子であり、S変換子は導波棒の外部の固定端に配置している。M変換子の取付け状況は写真2に示す通りである。

3.2 信号処理方法

本試験でのA E計測系は、電力中央研究所「A E特性総合測定解析装置⁷⁾」を主として使用した。写真3にその全景写真および図3.8にその構成図を示す。また、表3.1に本試験で使用した主要パーツの仕様を示す。

プリアンプの利得は20dBとした。また、フィルクの増幅設定は300KHz - 2MHzとした。増幅低下限を300KHzと比較的高く選んだ理由は、低周波領域で高いノイズの影響を小さくすること、周波数下限を上げさせるとA E波形の立上りと立下りがシャープになり、A E値の位置精度にとって有利であるものと考えたことによる。メインアンプの利得は40dBとし、プリアンプと合わせた総合利得を60dBにした。

MおよびS変換子系の出力を表3.1に示したディスタクリミネータと累積カウンタに入れ、リングダウン計数モード(不感時間 off)でそれぞれ1.5Vと3Vの2レベルに設定したしきい値の下にA E検出計数を連続的に測定した。一方、M変換子出力をエンベロープアダプタに入れ、波高分析器用のピークホールドに変換し検出のA E振幅分布の解析に利用した。

A、B、CおよびD変換子系はLCAロケータに使用した。LCAロケータは、正三角配置の3個の検出系から包絡線検波およびパルス位回送を通して作成した時間差パルスを利用して、それらの時間差の組合せと正三角形内に偏分化された64個の電圧をエレクトロニクス的に対応させて定量的なAE源位置測定を行なうものである。本試験の場合には、変換子A-C-Dが組む配置面(A面)と変換子B-C-Dが組む面(B面)を正三角位置測定系とみなし、現れは検測では5分間ずつ交互にA面とB面の位置測定計測を行なうこととした。その際、位置測定に利用していないAまたはBの変換子出力はゲート用を使用した。A面測定(A、CおよびD変換子出力利用)の場合には、B面で発生したAE信号によるA面位置測定をため、B変換子出力が1V/60dBを越えると約10msecのアナログコンパリアンティンクアウトパルスを発生させ、この間には位置測定計測を停止させるようにしている。写真4は、このようなゲートパルスの発生状況を示すシロ写真であり、上からA変換子系メインアンプ出力、B変換子系ゲートパルス出力、CおよびD変換子系メインアンプ出力の波型記録用である。ゲートパルスが発生した後にA変換子系にAE信号が発生した場合には、A変換子系のLCAロケータ入力が増幅されるようになっている。

3.3 AE源位置測定方法

本試験では、次のようなAE特性をオンライン、リアルタイムで測定した。

- (1) AE信号波形とその過渡成分
- (2) リングダウン計測法による全試験期間のAE累積計数値
- (3) 振動計測法による短時間AE計数値とその累積計数
- (4) AE振動分とその発生位置パラメータ
- (5) AE源位置測定

ただし、(3)の短時間振動計測データについては、包絡線検波信号のテープレコーダ記録を後日再生し、波高分析用のマルチスケータ(MCS)モードで求められている。波高分析用のマルチスケータ(BIOMATION社製8100型)リングダウン計測には0.5 msec/chを用いた。この際、記録モードはプリトリガモードとし、サンプリングレートは0.5 msec/chを用いた。リングダウン計測モードに記録された振動計測は、そのD-A変換出力をオシロスコープTR-6120トラックキングコープに入力し、増幅スペクトルをオシロスコープで調べた。

リングダウン計測後、AE振動分布およびAE源位置測定は、既述したような信号処理を経て、それぞれNF回路社製トランジスタ用カウンタ/プリンタ、キヤンベラ社製8100型1Kチャネル波高分析器およびNF回路社製LCAロケータを用いて計測した。

AE源位置測定は、振動分布および位置測定は各測定データはデック社製PDP-11/05ミニコンピュータに送られ、その中で個々の振動計測を基に、グラフィックディスプレイに表示され、ハードコピー化された。

その際、AE振動分布の測定データについては次のようなパラメータの演算処理がミニコンピュータ内で行なわれている。

- (1) 対数振幅分布均配A:
$$\log n(i) = A \log i + B \quad (1)$$

ここで、iはピーク振幅、n(i)はそのような振幅をもつAE振動数、Bは対数振幅分布の定数。

- (2) ピーク振幅しきい値 a 以上の全振動計数N:
$$N = \sum_{i=a}^{\max} n(i) \quad (2)$$

- (3) 振動平均振幅V/N:
$$V = \frac{\sum_{i=a}^{\max} n(i) \cdot i}{N} \quad (3)$$

- (4) 全エネルギーEと振動平均エネルギーE/N:
$$E = \sum_{i=a}^{\max} n(i) \cdot i^2 \quad (4)$$

また、AE源位置測定はA面およびB面の測定データについては、それぞれ5分間計50分間におけるAE測定数を供試体エネルギーが面の平均面積割りに表示するような振動表示処理を行なっている。

(2) その保持期間中のAE発生率は、試験開始時には多少高いが、すぐに低下した後、2000サイクル付近から再び上昇し、最終的な高周波帯に近づくにつれて増加する傾向にある。

(3) 曲げ荷重の増加時のAE発生率も試験の進展に伴って上昇する。なお、試験末期の3700サイクルで逆に多少減少しているのは、AE計測系の感度を低下させたことによる。

図4.5は、試験中にオンライン連続測定したAE累積データの中から約250サイクル毎に代表例を導出して3次元表示としてまとめたものである。また、このようなAE累積分布から得られる前述のAEパラメータ、 $-A$ 、 V/N 、 E/N 、 N および E の試験過程の変化を図4.6に示す。両図から次のような結果が得られる。

(1) 最初の試験を中断し室温まで温度を下げた後室温し定常試験を再開した1000サイクルの前段で、 V/N 、 E/N 、 N および E に大きな変化が生じている。これは、降重と昇重の異なるAE発生率の異なる状態に無影響ではないことを意味している。

(2) 2600サイクル付近よりNの増大、 V/N と E/N の減少、およびAの増加の傾向が見られる。

(3) 最終段階の3600サイクル以降ではNの急増と共にEも急増したが、 V/N と E/N の減少およびAの増加の傾向は持続した。

図4.7は、オンラインで計測した低周波帯のAE位置測定結果の代表例である。定常サイクル試験では、すでに図4.3で示したように、曲げ変位変化が生じる極めて短時間の中にA、Eの集中発生があること、高周波帯ではAEの発生率が低くかつ伝播速度が大きいこと、AE発生法に似ていない値レベルの固定点の増大が確認されていること、などの理由によって、図4.7に示したAE位置データは必ずしもAE発生源の真の性状を示していないと共に、位置誤差はらつきも大きい。しかし、試験末期では低周波帯のAE位置データの増加傾向が明らかに認められる。

これまでの共同研究で実施してきた定常の低周波帯試験におけるAE計測では、それぞれの配管試験で定められた負荷条件下での低周波帯のAE特性を調べてきた。このことは、実際の生じ得る種々の負荷条件下で、AE法により配管試験の進展を監視しようとするAE法実用化研究に対しては、十分な信頼の確保とAE法の有効性の検証は期待しにくい。そのため、実験配管の配管試験へのAE法の適用性が調べられるような負荷条件下でのAE法主体の配管試験方法を今後実施して行くことが必要であると考えられる。

本論文においては、以上のレビューを立ってその予備的検討を行なうために、配管試験中の種々の段階で、従来のクレープ型試験に感度を考えない通常の伝播速度のAE法試験を実施を行なった。このため、図4.8に、0、1000、1700、2300、3000および3600サイクル毎に発生率を5mmの3角波曲げ荷重曲げ荷重曲げ荷重を与え、その際の

4. AE計測結果およびその評価

4.1 定常クレープ型試験

本試験において観察された代表的なAE信号および主なノイズの波形および周波数スペクトルの測定例を図4.1に示す。図4.1に示すAE信号は、ハイパスフィルタで300kHz以下をカットしているが、それ以上ではほぼフラットな周波数スペクトル（1/f特性）は観察され、クレープ型試験過程でその性状はほとんど変化しなかった。一方、図4.2に示したノイズは典型的な起因のものと考えられるが、AE信号とは異なる周波数スペクトルが大きく異なっており、このような両者の相異を積極的に利用することによって、AE信号とノイズとの判別は比較的容易であることを示している。

図4.2は、リングダウン計数法による全試験過程のAE累積計数曲線である。図中の4本の曲線は、MおよびS検出系のそれぞれ2レベルのしきい値設定で得られたものであり、図中の記号は、

- M : M検出系、しきい値15V/60dB
- M' : M検出系、しきい値3V/60dB
- S : S検出系、しきい値15V/60dB
- S' : S検出系、しきい値3V/60dB

である。図4.2から次のような結果が得られる。

(1) MおよびS検出系の累積曲線は試験初期ではほとんど一致しているが、約300サイクル付近からM検出系の方が計数が高くなるのに対して、S検出系では試験の終了時までほとんど一定の計数増加傾向を示す。

(2) M検出系では、しきい値レベルの差によらず、約3000サイクル付近から累積曲線の勾配が上昇した。3700サイクル前後からAE計数が急増し、その結果から本試験のリーク漏れに至ったことは既述した通りである。

(3) MおよびS検出系で上記のように計数差が生じる理由としては、高周波帯ではステレンレス鋼の伝播速度が大きく⁶⁾MとS検出系の配管位置の差が大きくなること、さらに、S検出系への信号伝播には遅延がありこの部分での信号減衰が大きかったこと、などが考えられる。

図4.3および図4.4は、図4.2が全試験過程の累積データであったのに対して、代表的な5試験過程における定常時のAE発生率特性の測定結果である。両図は、多数計数法によるそれぞれ計数データおよびその累積計数の増大変化を示しており、両図から次のような結果が得られる。

(1) 曲げ荷重保持期間中におけるAE発生状況は一様である。

5. 結 び

本報告では、SUS-304ステンレス鋼バンド管試験体に対する600℃クリープ遅れ試験（CFT-BE-20）における遅れ試験結果の概要とAE計測結果を取りまとめた。AE計測の主結果をまとめれば次の通りである。

- (1) 油圧ジャッキ荷重増設位±30mm、エルゴを押し開く測り100秒間の保持時間を持つ台形波の定位置による定常クリープ遅れ試験におけるAE特性としては、約300サイクル付近からAE計測率がわずかに増加傾向を示したが、明確なAE計測率の増加は約3000サイクルから生じた。3700サイクル付近より急増して3806サイクルにて急激な増進を遂げて試験を終了した。試験末期には、AE振幅分布やAE位置測定データも顕著な変化が生じた。保持期間内のAEの発生状況は一律であり、遅れ試験の進展に応じてその保持期間の発生率は増加した。一方、AE信号波形とその周波数スペクトルには試験経過に伴う変化は見られなかった。
- (2) 1000サイクル時点で行なった室温低下後昇温の熱サイクルによって、曲げ荷重変動原因が変化したが、AE特性とくにAE振幅分布特性にその影響が顕著に現われた。
- (3) 信号の伝播減衰量は比較的大きく、とくに帯域幅が介在するような場合に著しい。
- (4) AE法の有効性評価を行なうために、定常試験の試験機で先導位±5mmの1cpm三角波状定位置測定の遅れ増進試験を導入した。この場合のAE特性は(1)と同様な変化傾向を示し、とくに急激な増進付近ではAE発生率とエネルギーの両方が大きく、AE法の遅れき阻害の予測性は十分高いことが確認された。

本共同研究の間隔内には、上記のクリープ遅れ試験のほかにも多数の曲げ遅れ試験およびナトリウム配電熱力ラチェット試験に対してAE計測を行ない、それぞれの試験に特徴的なAE特性データの集積が図られた。このようなAE計測の実績から、両様な配電熱力試験に対しては、十分な試験電磁誘起をAE法が所有していることは明らかになったものと云えよう。しかし、AE法を実験の遅れ増進のオンライン監視に実用化するためには、AE計測法をさらに詰める必要があると同時に、さらに根本的には、実験における環境条件および負荷条件下で遅れ増進を定量的にAE法で検知し得るかどうか、というAE法の適用性を十分に調べておくことが重要課題であろう。AE法の遅れ増進の検知に影響するパラメータとしては、遅れ増進の性状、温度、負荷量、ひずみ速度などが挙げられよう。

本試験においては、このようなAE法の実験適用性評価の一環として、上述のような評価試験を実施し、ある条件下ではAE法の有効性は十分高いことを示す結果が得られた。しかし、一方では、AE法法の改善、温度サイクルに伴うAE特性の大きな変化、信号伝播遅延の減衰の因

AE特性を調べることにした。

図4.8は、そのようなAE評価試験におけるAE計測率の測定データである。定常負荷試験における図4.9のAE振幅分布の結果と同様に、最小クリープ遅延時のAE計測率は著しく高い値となっており、このような低荷重、低負荷速度の場合でもAE法によって微小クリーク発生速度の遅れ増進の存在を明確に知ることができる。ただし、S変換子系の場合には図4.2の場合と同様に試験最終段階でもAE計測率の増加はない。また、試験終了後、試験体温度を急下させた後、急冷した際にも±5mm定位置の遅れ増進試験を行なったところ、ほとんどAE信号は観測されなかった。このことは、図4.8に示した計測データが、高温の配電熱力試験体から発生するAE信号によるものであることを意味すると同時に、試験機の近傍に配置したAE検出系で実験進展中の遅延を感知していること、比較的小さな曲げ荷重が負荷されると遅れ増進の存在が判定できることを意味している。

以上と同様な傾向を示すが、より高い温度と荷重で遅れ増進の存在を判定するものとして、図4.9に示すAE振幅分布パラメータの利用が挙げられよう。同図は、定常負荷試験における図4.8と対応するデータであるが、1つのAE振幅分布の測定データからE、N、E/N、V/Nなどのような多くの情報が得られる利点がある。図4.9では、最終クリーク時にはEとNが急増する特徴があるが、一方、3000サイクル程度までの荷重増進ではNは増加傾向にあるが、Eはほとんど一定でありE/NとV/Nは減少傾向にあることが特徴的である。

±5mmのAE評価試験におけるAE測定データをA面とB面とに分けてそれぞれ図4.10と図4.11を示す。本試験においては、既述したAまたはB変換子系によるアンチコリンゲンゲートの設定条件が一致していないという計測上の問題点があったため、図4.10のA面と図4.11のB面との間の互換的な比較は避けざるを得ないが、A面、B面ともに、微小クリークが生じた最終段階では遅れ増進に多数のAE測定値が集中している。

題 震れき裂の性状認識の問題。など今後検討すべき課題も山積していることが明らかとなった。
以上の点に関しては、動燃事業団と電力中央研究所間のAE法に関する第3次共同研究として、
AE法の適用性を調べることを目的とした第3次共同研究が、本第2次共同研究に引き続き実施さ
れつつある。

参 考 文 献

- 1) 動燃・電研共同研究報告「発音検出法による高速増殖炉1次ナトリウム冷却系配管の震れ損傷過程の追跡法(第一報)」J256 73-02. CRIEPI-72001 (1973-1)
- 2) 同上(第二報) CRIEPI-74002. J256 74-03 (1974-5)
- 3) H. Nakasa, S. Ueda and T. Nagata: "Acoustic Emission Analysis on Failure of Fast Breeder Reactor Piping Components" 2nd AE Symp. (Tokyo), Session 9-21/43 (1974-9)
- 4) 仲佐 永田: 「配管の震れ損傷過程へのAE法の適用について」, 圧力技術132) 72/79 (1975-4)
- 5) 動燃・電研共同研究報告「発音検出法による高速増殖炉1次ナトリウム冷却系配管の震れ損傷過程の追跡法(第三報) - ナトリウム配管の熱応力ラチェット試験におけるAE計測」(印刷予定)
- 6) 同上(第四報)「一ーステンレス鋼バンド管およびノズル配管要素の研げ震れ試験におけるAE計測」N941 77-77. CRIEPI 276005
- 7) 仲佐: 「音響放射特性を利用する材料診断技法」電力中研連合報告集29 (1975-11)

PNC TN941 77-172
CRIEPI 77002

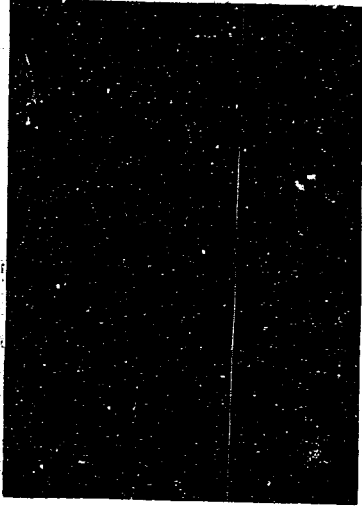


写真3 AB計測装置

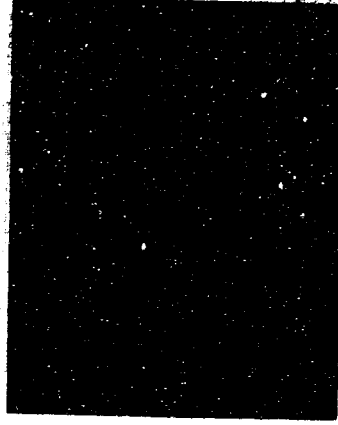


写真4 LCAロケータ用入力信号波形
[上からA. B. C. D 脈電子系入力、ただしA. C.
Dはマイクアップ出力、Bはアンプコイルサテ
ルス出力: 縦軸 50mV/div (Bのみ5V/div).
横軸 20ms/div]

PNC TN941 77-172
CRIEPI 77002

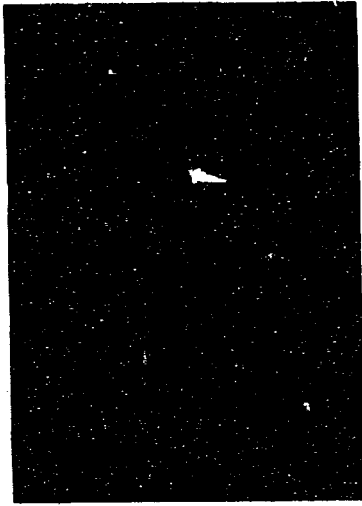


写真1 CFT-BE 202 試験



写真2 AE 脈電子系付付 (Mセンサ)

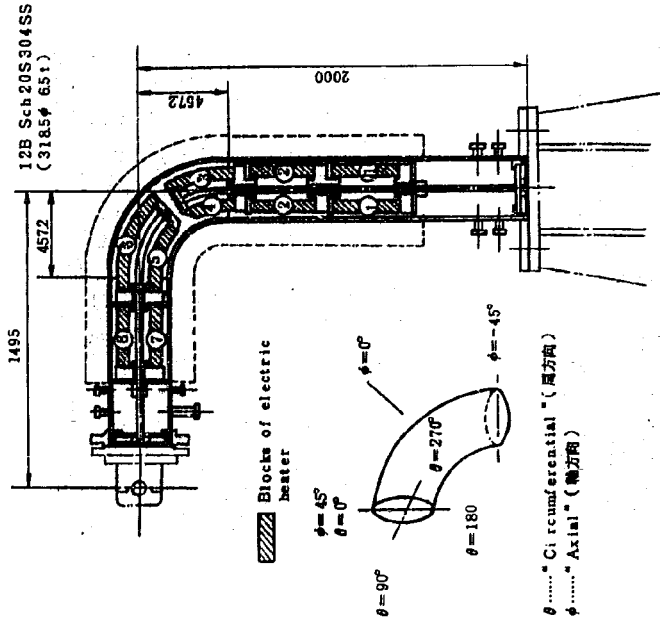


図 2.1 BB-202 供試体形状および内装ヒータ構造

表 2.1 供試体材料の機械的性質及び化学組成

機械的性質	引張り強さ (kg/mm ²)	62
化学組成 (%)	伸び (%)	61
C	0.05	
Si	0.65	
Mn	0.97	
P	0.027	
S	0.01	
Ni	8.63	
Co	18.53	

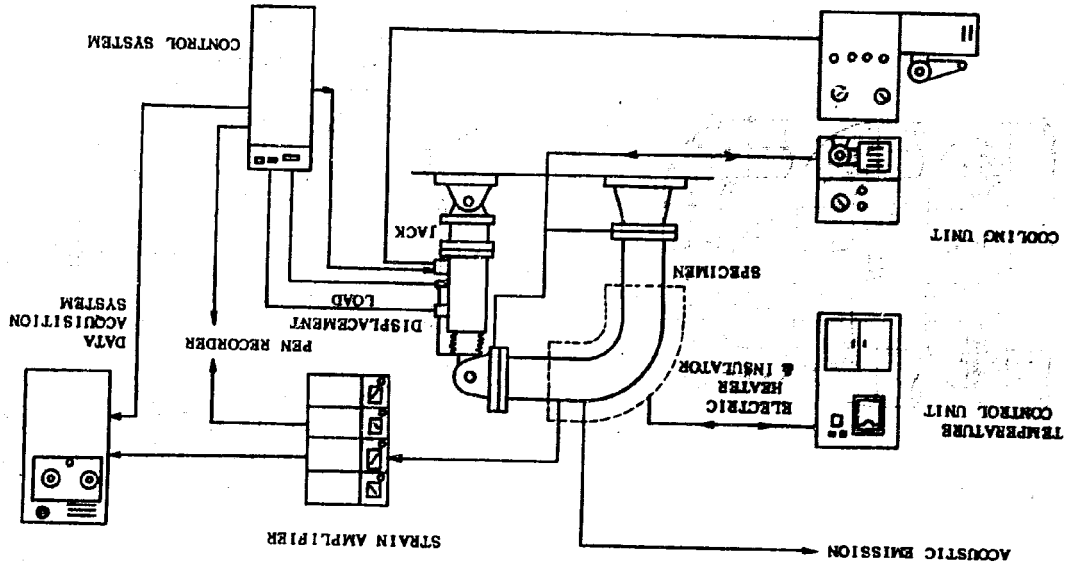
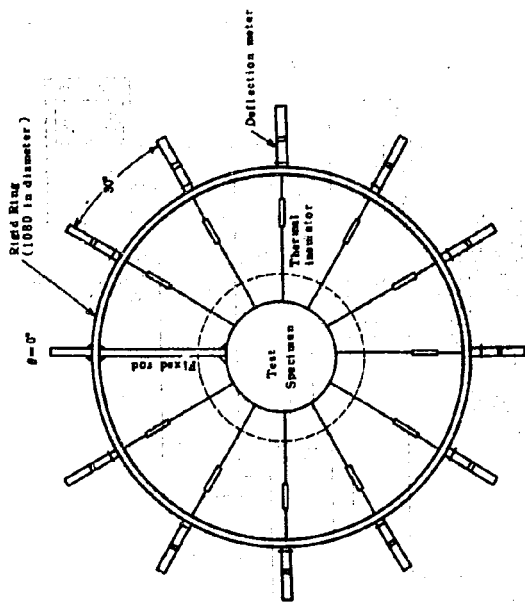


図 2.2 テリアーア製れ試験装置の全体構成



φ=180°

図 2.3 断面形状計測器具

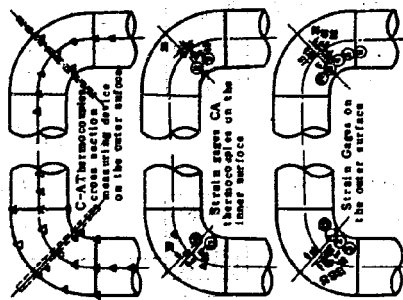


図 2.4 BE 202 供試体への各種測定器の取付け配置

表 2.2 BE 202 試験経過

日時	試験条件																																																																								
S513/2	1. 室温における静的試験 δ (mm) = +2, -2, +4, -4, +6, -6, +8, -8, +10, -10 2. 室温における動的試験																																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>変位</th> <th>初期</th> <th>T₁</th> <th>T₂</th> <th>T₃</th> <th>サイクル数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(1) $\delta = \pm 5$mm</td> <td>up</td> <td>0.5秒</td> <td>0.3秒</td> <td>0.3秒</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>(2) ± 10</td> <td>up</td> <td>0.5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>432</td> </tr> <tr> <td>(3) ± 10</td> <td>up</td> <td>5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>(不明)</td> </tr> </tbody> </table>	変位	初期	T ₁	T ₂	T ₃	サイクル数	(1) $\delta = \pm 5$ mm	up	0.5秒	0.3秒	0.3秒	120	(2) ± 10	up	0.5	0.3	0.3	432	(3) ± 10	up	5	0.3	0.3	(不明)																																																
変位	初期	T ₁	T ₂	T ₃	サイクル数																																																																				
(1) $\delta = \pm 5$ mm	up	0.5秒	0.3秒	0.3秒	120																																																																				
(2) ± 10	up	0.5	0.3	0.3	432																																																																				
(3) ± 10	up	5	0.3	0.3	(不明)																																																																				
3/5	3. 600℃における動的試験																																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>変位</th> <th>初期</th> <th>T₁</th> <th>T₂</th> <th>T₃</th> <th>サイクル数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A $\delta = \pm 5$mm</td> <td>down</td> <td>0.3秒</td> <td>0.3秒</td> <td>0.3秒</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>B ± 10</td> <td>down</td> <td>0.5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>C ± 10</td> <td>down</td> <td>5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>D ± 5</td> <td>down</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>E ± 10</td> <td>down</td> <td>0.5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>F ± 10</td> <td>down</td> <td>1</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>(不明)</td> </tr> <tr> <td>G ± 20</td> <td>down</td> <td>1</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>(不明)</td> </tr> <tr> <td>H ± 20</td> <td>down</td> <td>1</td> <td>100</td> <td>0.3</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>I ± 20</td> <td>down</td> <td>1</td> <td>72000</td> <td>100</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>J ± 5</td> <td>up</td> <td>1.5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>K ± 30</td> <td>up</td> <td>1.5</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>1.0</td> </tr> </tbody> </table>	変位	初期	T ₁	T ₂	T ₃	サイクル数	A $\delta = \pm 5$ mm	down	0.3秒	0.3秒	0.3秒	10	B ± 10	down	0.5	0.3	0.3	20	C ± 10	down	5	0.3	0.3	50	D ± 5	down	0.3	0.3	0.3	20	E ± 10	down	0.5	0.3	0.3	20	F ± 10	down	1	0.3	0.3	(不明)	G ± 20	down	1	0.3	0.3	(不明)	H ± 20	down	1	100	0.3	10	I ± 20	down	1	72000	100	4	J ± 5	up	1.5	0.3	0.3	26	K ± 30	up	1.5	0.3	0.3	1.0
変位	初期	T ₁	T ₂	T ₃	サイクル数																																																																				
A $\delta = \pm 5$ mm	down	0.3秒	0.3秒	0.3秒	10																																																																				
B ± 10	down	0.5	0.3	0.3	20																																																																				
C ± 10	down	5	0.3	0.3	50																																																																				
D ± 5	down	0.3	0.3	0.3	20																																																																				
E ± 10	down	0.5	0.3	0.3	20																																																																				
F ± 10	down	1	0.3	0.3	(不明)																																																																				
G ± 20	down	1	0.3	0.3	(不明)																																																																				
H ± 20	down	1	100	0.3	10																																																																				
I ± 20	down	1	72000	100	4																																																																				
J ± 5	up	1.5	0.3	0.3	26																																																																				
K ± 30	up	1.5	0.3	0.3	1.0																																																																				
3/8-14	4. 500℃における定常サイクル																																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>変位</th> <th>初期</th> <th>T₁</th> <th>T₂</th> <th>T₃</th> <th>サイクル数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\delta = \pm 30$mm</td> <td>down</td> <td>1.5秒</td> <td>100秒</td> <td>0.3秒</td> <td>3810</td> </tr> </tbody> </table> <p>1000 サイクル 停止、降速 (ゲージ脱着) 1700 " 停止 (AE 試験のため) 1715 " 石けん水エッチング時に測電・停止 (ヒーター一時 off) 2330 " 停止 (AE 試験) 3000 " " 3795 " " 3810 " 内圧低下のため停止、降速、石けん水によりエアリーク試験</p>	変位	初期	T ₁	T ₂	T ₃	サイクル数	$\delta = \pm 30$ mm	down	1.5秒	100秒	0.3秒	3810																																																												
変位	初期	T ₁	T ₂	T ₃	サイクル数																																																																				
$\delta = \pm 30$ mm	down	1.5秒	100秒	0.3秒	3810																																																																				

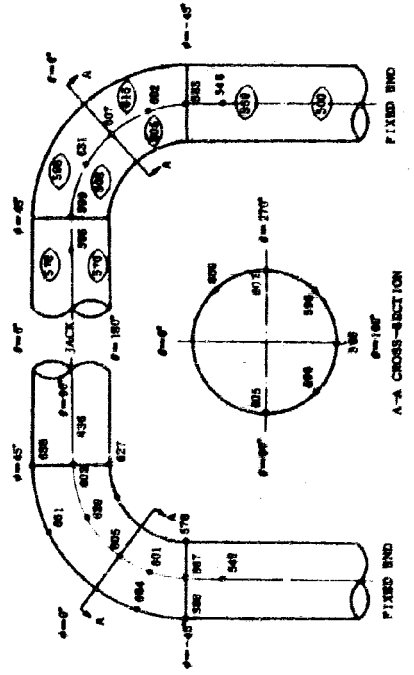
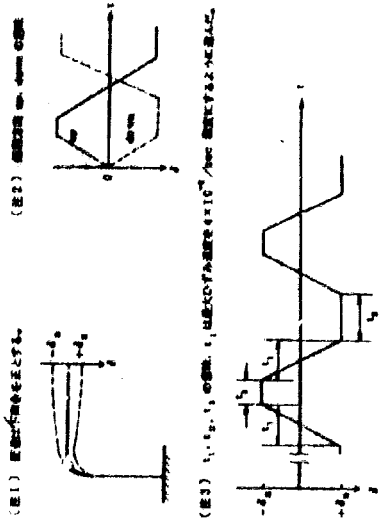


図 2.6 ヒートアップロッド最長固定位置 (○内) と得られた温度分布

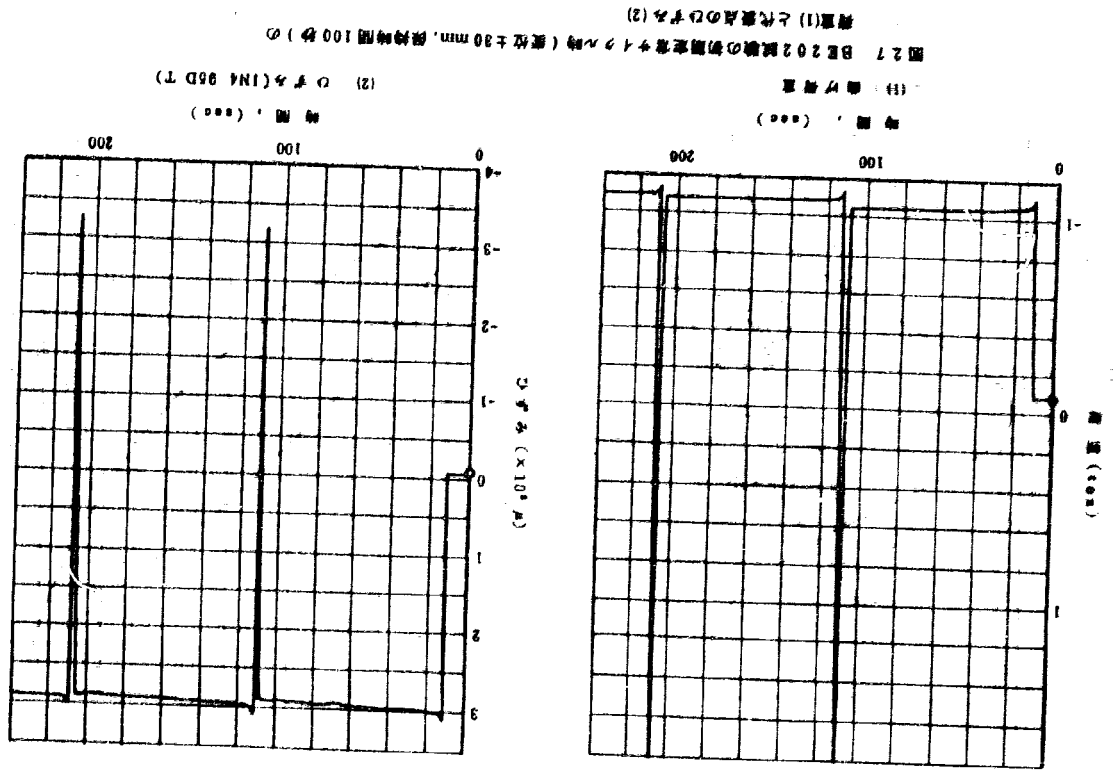


図 2.7 B 型 202 試験の初期温度分布 (1) 曲げ荷重 (2) ひずみ (IN4 95D T) のひずみ (1) と代表点のひずみ (2)

PNC TN941 77-172
CRIEPI 77002

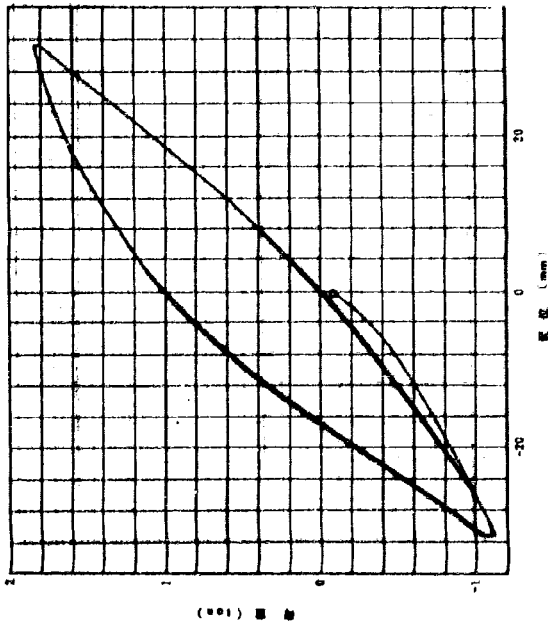


図 28 BE 202 試験における定常サイクル初期時の変位量と荷重の関係

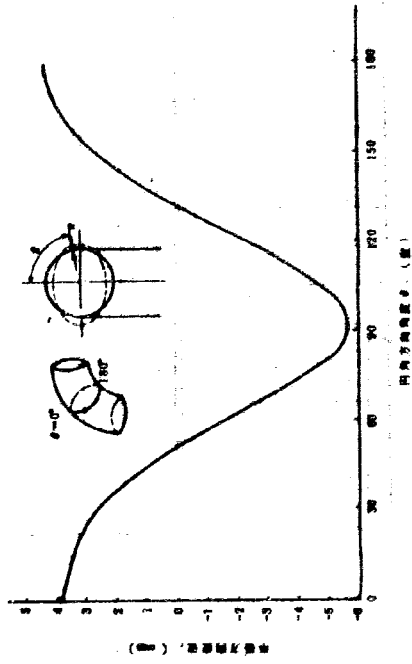


図 29 保持開始時のエルゴ中央断面の半径方向変位

PNC TN941 77-172
CRIEPI 77002

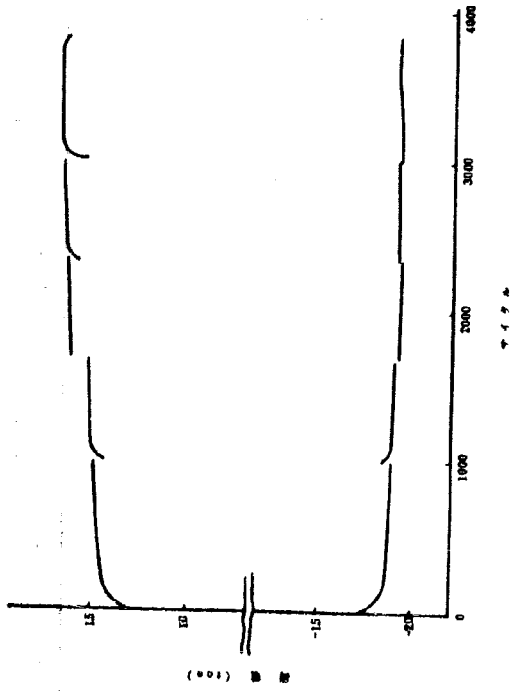


図 210 BE 202 試験における荷重ピークの変化

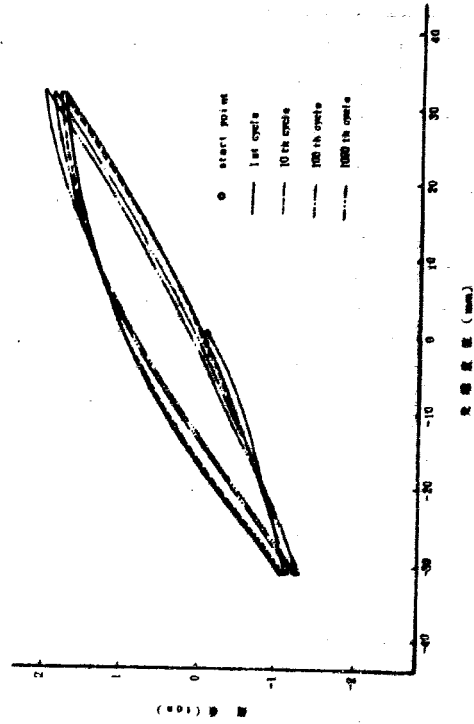


図 211 BE 202 試験における変位増大サイクルでの荷重と変位量との関係

表 3.1 A E 特性適合測定解析装置各部仕様

1 信号発生・処理系	
トリガジ	10チャンネル (NF 回路)
利 得	20/40dB, 最大 3Vp-p / 50Ω
入力抵抗値	6kVrms (入力 50Ω 終端時)
周波数特性	10kHz ~ 2MHz (±3dB 以内)
減衰特性	HPF (40dB/OCT, 5kHz 以下 -60dB)
入出力インピーダンス	20kΩ, 30pF/50Ω 不平衡
入力形式	SINGLE/DIFFERENCE 選択
パルス幅	10チャンネル (NF 回路)
利 得	1
入出力インピーダンス	50Ω
減衰周波数	HPF: FLAT, 100k, 300k, 1MHz LPF: FLAT, 20k, 600k, 2MHz
減衰特性	40dB/OCT 傾斜, HPF: -60dB, LPF: -50dB
メインアンプ	10チャンネル (NF 回路)
利 得	0 ~ 60dB (連続可変), 最大 10Vp-p / 200Ω
入出力インピーダンス	50Ω (不平衡) / 10Ω 以下
入力抵抗値	25kVrms 以下 (入力 50Ω 終端時)
周波数特性	500Hz ~ 2MHz (±3dB)
耐振動特性	80 mV/dB (001 ~ 1V), 0V/0V, 1V/1V
ディスプレイ	4チャンネル (NF 回路)
入 力	4チャンネル各 2レベル (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2)
ディスプレイ	50mV, 500mV, 5V 各段 × 0.1 ~ × 1
不 振 時 間	OFF, 0.1, 1, 10ms 各段 × 0.1 ~ × 1
パルス出力	TTL レベル, 負荷 (500ns)
アナログ出力	最大 10V (入力 50Ω 終端時)
エンベロープアンプ	4チャンネル (NF 回路)
入 力	4チャンネル (A, B, C, D)
包絡線出力	時定数 立上り 3ms, 立下り 100ms, 全波/半波 整流/切替
ビーム出力	ピークホールド方式, パルス幅 5ms, ビーク電圧 0.5 ~ 1.5 倍可変
アナログ出力	実効値, 最大 10V (DC)
標準カウンタ	4 × 3チャンネル (NF 回路)
入 力	ディスプレイ入力 - 8 出力 8チャンネル
桁 数	10 桁
アナログ出力	任意の通線した 3 桁, 最大出力 0.99V
ディスプレイ出力	8 桁分, ディジタル値と共にプリンタに印字
リセット/プリント命令	手動およびタイマ (1 ~ 99 分), ディジタルカウンタ (1 ~ 999 桁) まで

表 3.1 A E 特性適合測定解析装置各部仕様 (続)

2 解析・表示系	
ディスプレイ	1式 (BIOMATION社)
形 式	BIOMATION 3000 型 810 線 5 インチ CRT
入 力	1/2チャンネル, ±50mV ~ ±5V, 50Ω
分 解 能	縦横 8 ビット
サンプルレート	10ms ~ 10μs/4ch, 各桁 × 1, × 2, × 5
メモリ	2048ワード
記録モード	逐逐, トリガホールドオフ, プリトリガ
標準解析装置	1式 (サケダ電研)
形 式	サケダ電研 TR-4120 トラッキングスコープ
入 力	-130dBV ~ 100dBV
周波数範囲	100Hz ~ 30MHz
トラッキングエラー	内 蔵
出 力	CRT 表示, アナログ出力
標準・拡張分解装置	1式 (CANBERRA社)
形 式	CANBERRA社 8100/8220 マルチチャンネル核高分辨器
チャンネル入力	1, 2, 4チャンネル
メモリアイズ	1k 算 0/4 ~ 4/4, 1/2 ~ 2/2, 1/1
データ取得方式	連続分析 (PHA) モード, マルチチャンネルスタナー (MCS) モード
PHAモード	10 ⁰ ~ 10 ⁶ counts, LOG 表示, 1 ~ 9 × 10 ⁹ (電圧/カウンタ)
MCSモード	10ms ~ 9μs/ch, (時間/計数率)
LCAロケータ	1式 (NIP 回路)
入 力	3チャンネル, 包絡線検波信号
ディスプレイ	手動 (50mV, 500mV, 5V 各段 × 0.1 ~ × 1), 自動 (10 ⁰ , 10 ¹ , 10 ²)
位置分解能	1次元 (8ゾーン), 2次元 (64ゾーン)
データメモリ	16 ビット
標準・拡張装置	1式 (DEC 社)
形 式	DEC-PDP 11/05
サイクルタイム	1.2ms
コアメモリアイズ	16K 語 (3 語 = 16 ビット)
1 / 0 回路	標準分析機, トリアジェントレコーダ, 増設機, LCA, キルダ
ディスプレイ	ディスプレイ ASR 33 (18 キヤクタ/sec)
プリンタ/ディスプレイ	ソニーデータロニクス 4012 型 (1023 × 780 点, 74 × 95 文字)
ハードコピー	ソニーデータロニクス 4010 型 (180 / 頁)

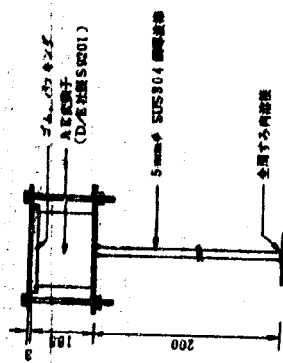


図 3.1 AE 変換器と導波管への取付け法

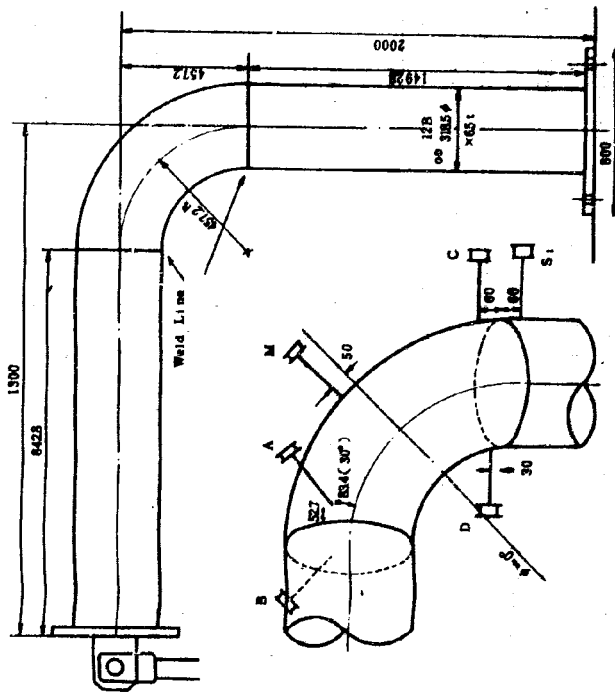


図 3.2 BE 202 試験における AE 変換子の配置図

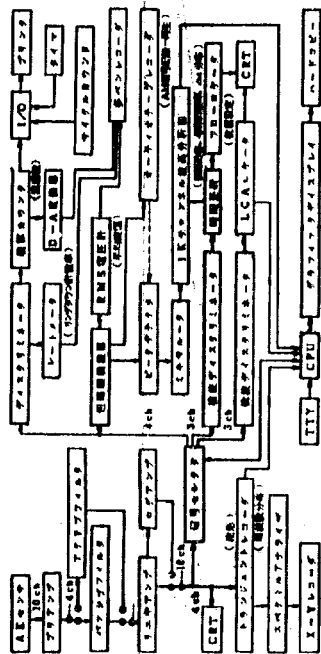


図 3.3 AE 特性総合測定解析装置の構成図

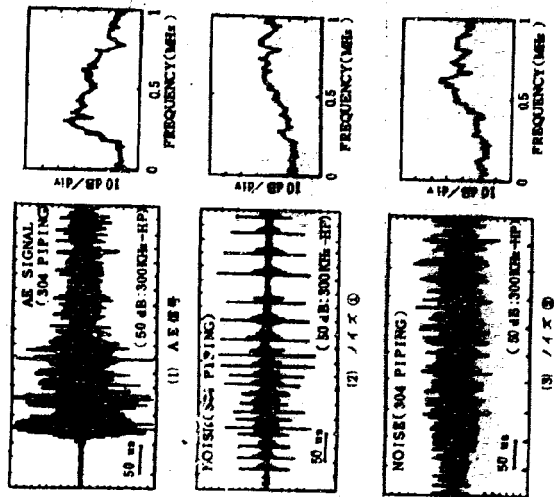


図 4.1 BE 202 試験で観測された代表的な信号の波形と周波数成分
(波形の縦軸: (1)は $\pm 0.2V$, (2)と(3)は $\pm 0.1V$)

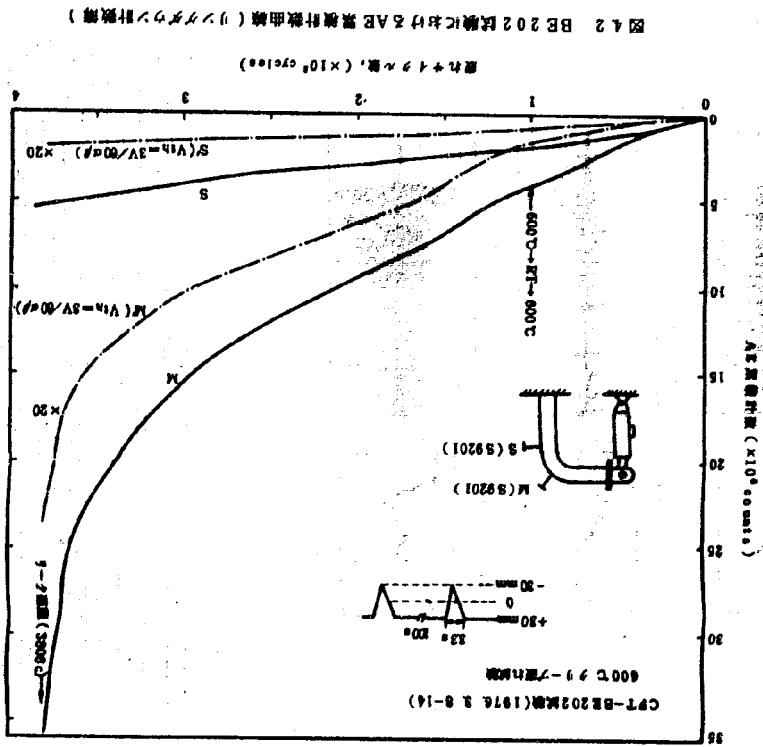


図 4.2 BE 202 試験における AE 累積計数曲線 (リニアログ計数曲線)

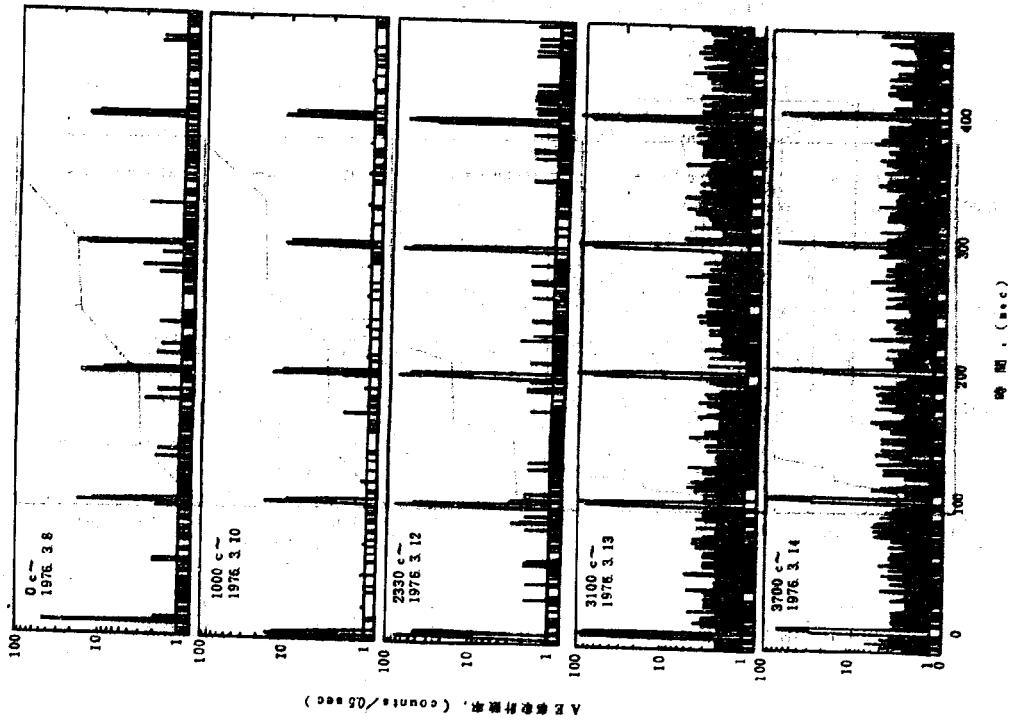


図 4.3 BE 202 試験における代表的な変れサイクル時の AE 計数率 (集計数率)

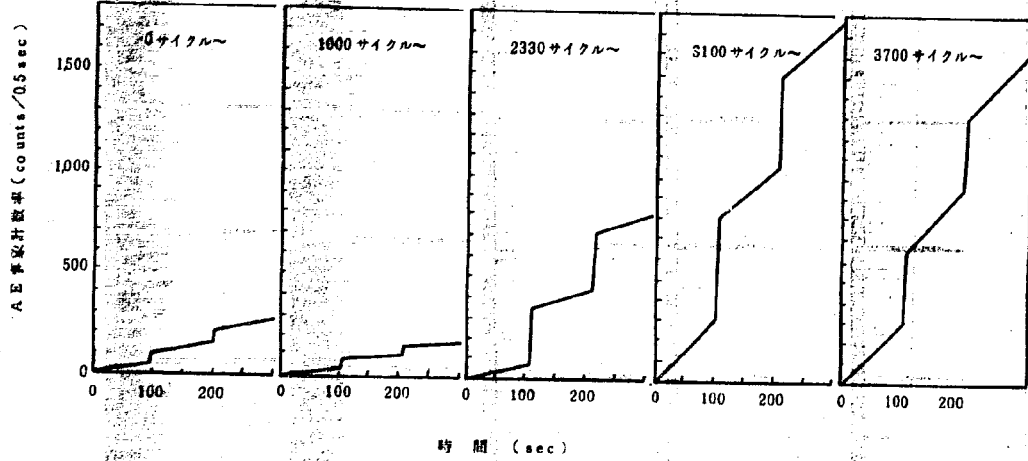


図 4.4 BE 202 試験における代表的な疲れサイクル時の AE 累積曲線拡大図 (事象計数簿)

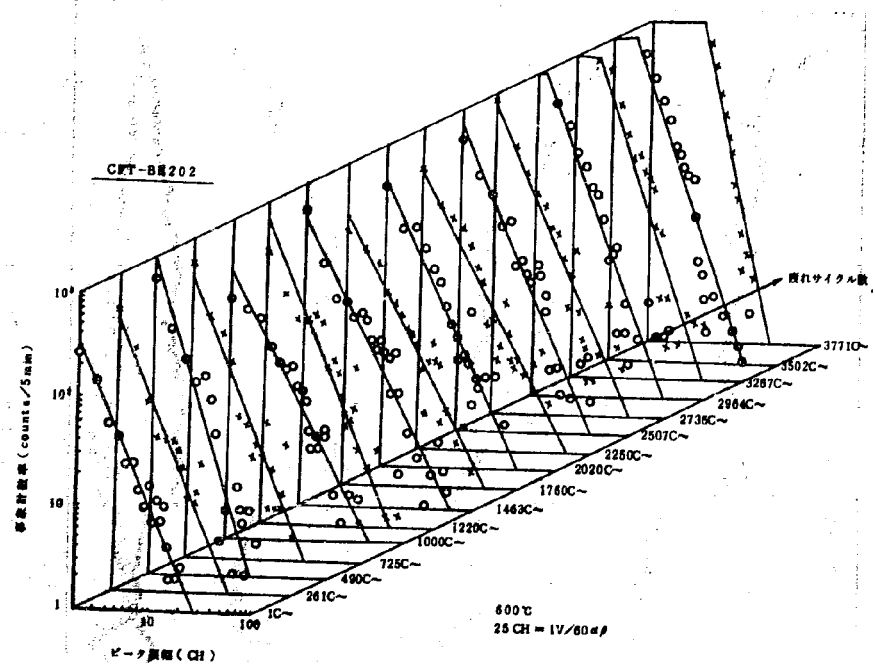


図 4.5 BE 202 試験における AE 振幅分布オンラインデータ (1)

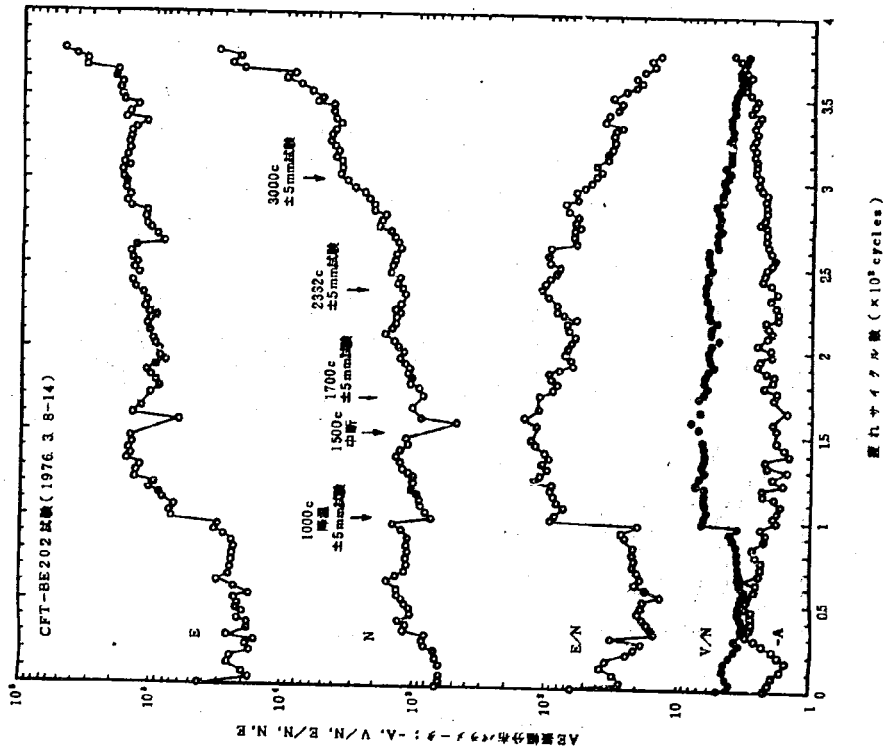


図4.6 BE202試験におけるAE振幅分布モニタリングデータ(2)

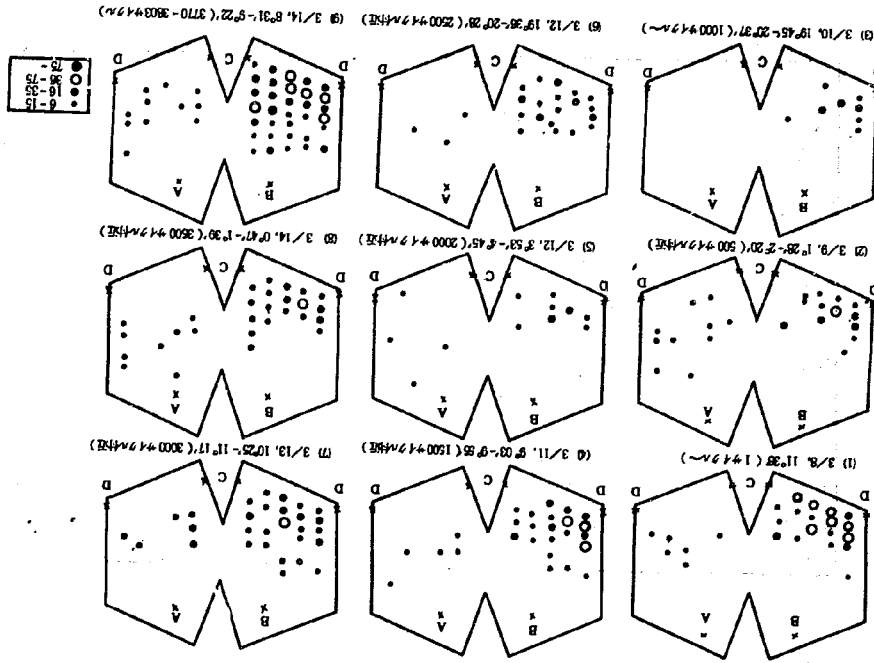


図4.7 BE202試験におけるモニタリングAE観測例
(周波数範囲: 100-600 KHz, 振幅しきい値設定: 0.5 V/80dB)

PNC IN941 77-172
CREEP 77602

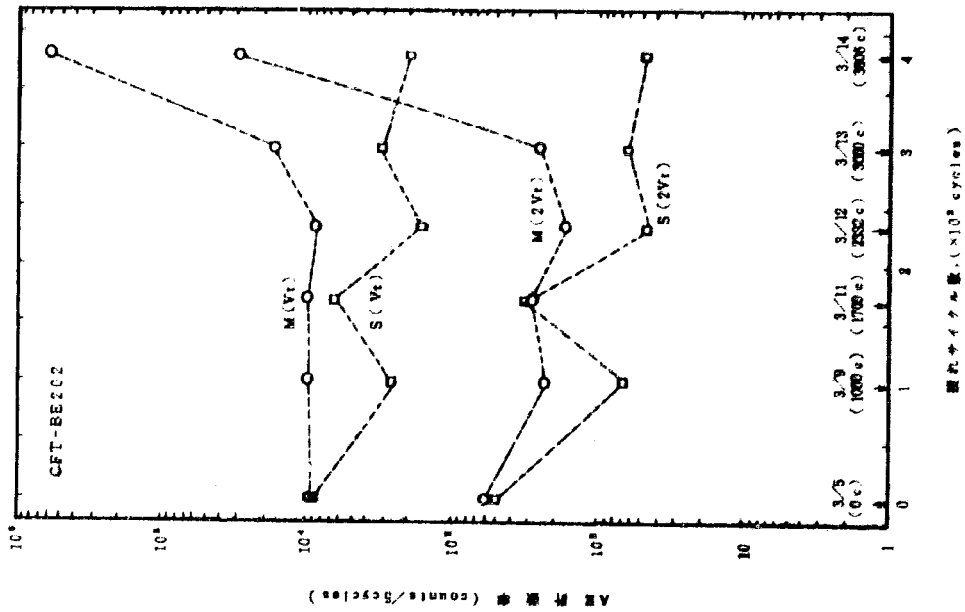


図4.8 BE202試験における±5mm負荷時のAE計数率の変化
(リングカウンタ数方式: しまい電圧 = $5 \times 0.3V/80dB$)

PNC IN941 77-172
CREEP 77602

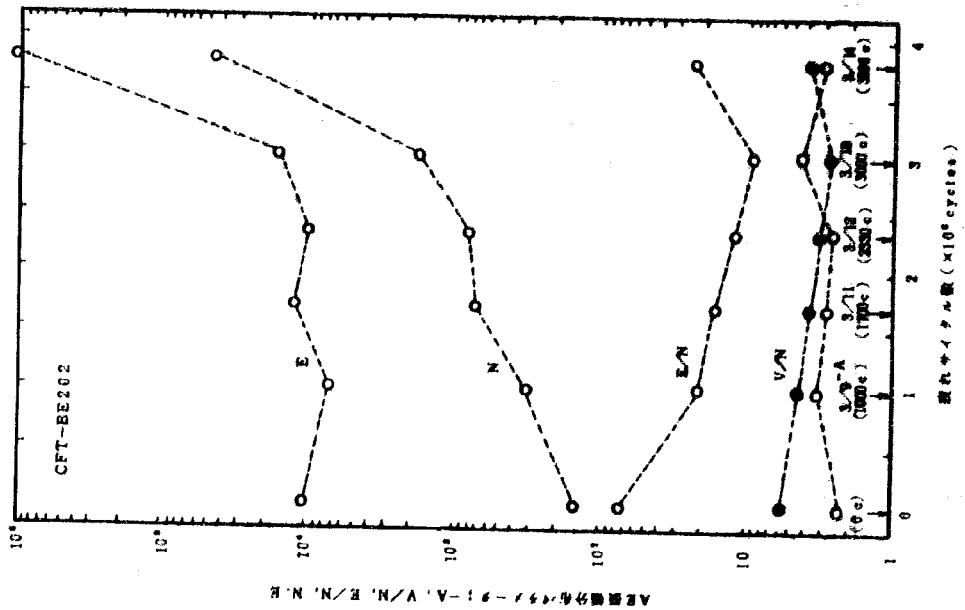


図4.9 BE202試験における±5mm負荷時のAE計数率の変化

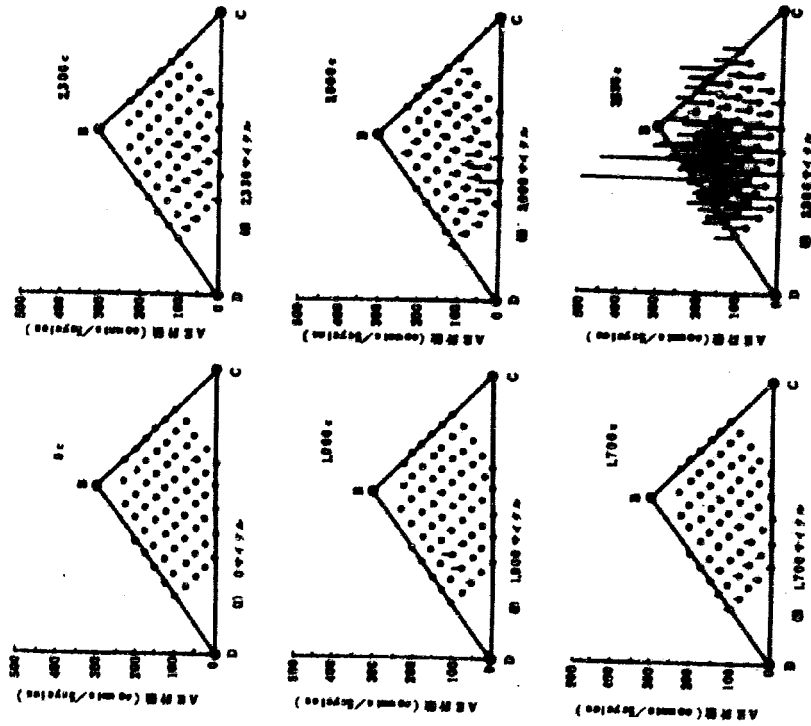


図 4.11 BE 202 試験における ±5mm 負荷時のオンラインAE 観測結果 (2) B 面

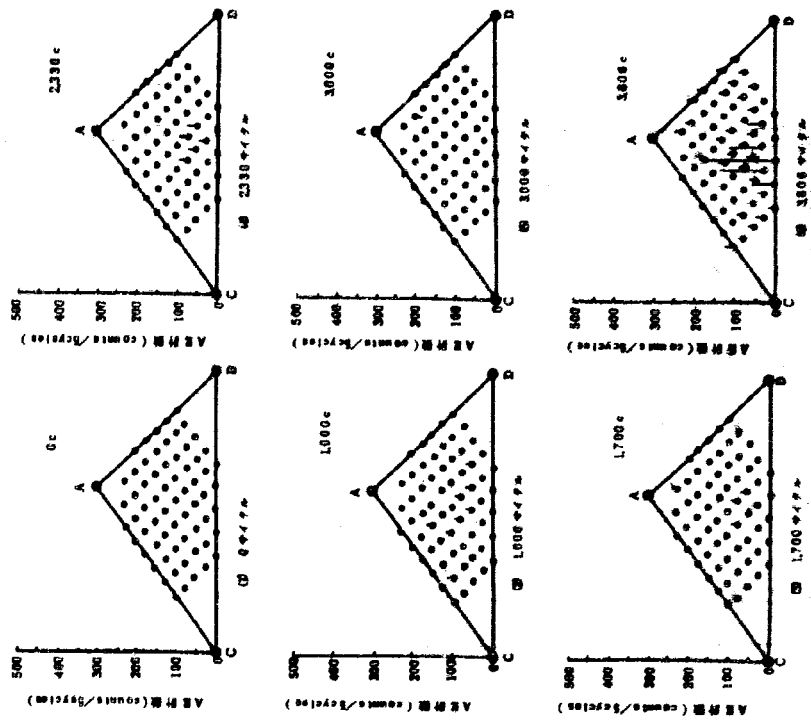


図 4.10 BE 202 試験における ±5mm 負荷時のオンラインAE 観測結果 (1) A 面