

JAERI-M
8005

A E 法による軽水炉圧力容器モデルおよび N S R R 用インコネル 718 管の内圧疲れき裂伝播挙動の監視に関する研究
(共同研究)

1979年1月

日本原子力研究所 安全工学部 構造強度研究室
電力中央研究所 エネルギー・環境技術研究所 原子力部

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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、複製などのお問合せは、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.

A E 法による軽水炉圧力容器モデルおよびN S R R用インコネル

7 1 8 管の内圧疲れき裂伝播挙動の監視に関する研究

(共 同 研 究)

日本原子力研究所安全工学部構造強度研究室

電力中央研究所エネルギー・環境技術研究所原子力部

(1 9 7 8 年 1 1 月 2 0 日受理)

軽水炉圧力容器ならびに配管系における非破壊検査法として、近年 Acoustic Emission (AE) 法を適用する試みが国内外において行われている。しかし、この方法を実機に適用して信頼性の高いデータを得るためにには、今後開発すべきいくつかの問題が残されている。

本研究では軽水炉圧力容器ノズル部およびN S R Rの照射キャップセル用インコネル7 1 8 管に欠陥が存在していることを想定し、圧力容器モデルおよびインコネル7 1 8 管に繰返し内圧を負荷したときの人工欠陥からのき裂の伝播挙動を A E 法によって計測した。人工欠陥は圧力容器モデルでは3個のノズル部の内面コーナIC, インコネル7 1 8 管では試験体の外表面に軸方向に設けた。これらの人工欠陥(切欠き)はいずれもダイヤモンドカッタによって加工した。

両試験体に設けた切欠きからのき裂伝播長さは A E 法の他に、電位差法(スマックゲージ法)も用いて計測した。両方法によるき裂伝播長さの計測結果では、定性的には両者はよく似た傾向を示したが、定量的に比較するにはまだ今後解決しなければならない問題がいくつかあることが明らかになった。A E 法は今後原子力発電プラントの非破壊検査の一つとして役に立つと考えるので、さらに試験研究をすすめていく必要があろう。

共同研究総括責任者

日本原子力研究所東海研究所前安全工学部長

(現 東海研究所副所長)

村主 進

担当者

1. 第5号圧力容器モデルの内圧疲れ試験

東海研究所安全工学部構造強度研究室

宮園昭八郎, 植田 健三, 古平 恒夫,

柴田 勝之, 磯崎 敏邦, 大場 敏弘,

中島 伸也, 川村 隆一, 松本 正勝

2. N S R R 用インコネル 718 管の内圧疲れ試験

東海研究所安全工学部構造強度研究室

柴田 勝之, 川村 隆一

住友重機械工業(株) 外来研究員

(現在同社平塚研究所勤務)

橋本 宗到

3. AE 計測

電力中央研究所エネルギー・環境技術研究所原子力部

大野 博教, 仲佐 博裕,

草薙 秀雄, 木村 英夫

JAERI-M 8005

Studies on the Monitoring of Fatigue Crack Propagation by Acoustic Emission Method in Alternated Internal Pressure Tests of Model LWR Pressure Vessel and NSRR Inconel 718 Tube

Mechanical Strength and Structure Laboratory
Division of Reactor Safety, Tokai Research
Establishment, JAERI

Nuclear Power Department, Energy & Environment
Laboratory, Central Research Institute of Electric
Power Industry (CRIEPI)

(Received November 20, 1978)

An acoustic emission method is recently applied to defects monitoring in the nuclear pressure vessel and piping for their non-destructive inspection. Some problems remain, however, for its practicability in the monitoring of nuclear power plants.

The acoustic emission procedure for monitoring the fatigue crack propagation has been studied in cyclic internal pressure tests of model LWR pressure vessel and NSRR Inconel 718 tube as a co-operative research work between the Japan Atomic Energy Research Institute and the Central Research Institute of Electric Power Industry. The results obtained by this study are described.

Keywords: Light Water Reactor, Pressure Vessel, Nuclear Safety Research Reactor, Inconel 718 Tube, Alternated Internal Pressure Test, Fatigue Crack Propagation, Nozzle, Acoustic Emission Method, Monitoring System, Non-destructive Inspection.

General Manager of Research Contract
Susumu Suguri

Alternated Internal Pressure Test of No.5 Pressure Vessel Model

Shohachiro Miyazono, Shuzo Ueda, Tsuneo Kodaira,
Katsuyuki Shibata, Toshikuni Isozaki, Toshihiro Oba,
Nobuya Nakajima, Takaichi Kawamura, Masakatsu Matsumoto

Alternated Internal Pressure Test of NSRR Inconel 718 Tube

Katsuyuki Shibata, Takaichi Kawamura, Muneto Hashimoto*

Acoustic Emission Measurement

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

* Sumitomo Heavy Industries, LTD.

** Central Research Institute of Electric Power Industry

目 次

1. 序 言	1
2. 圧力容器モデルおよびN S R R用インコネル718管の内圧繰返し試験	1
2.1 第5号圧力容器モデル	1
2.1.1 供試体	1
2.1.2 静的内圧試験	3
2.1.3 内圧繰返し試験	4
2.2 N S R R用インコネル718管	20
2.2.1 供試体	20
2.2.2 静的内圧試験	20
2.2.3 内圧繰返し試験	20
3. 内圧繰返し試験におけるA E特性の計測	28
3.1 第5号圧力容器モデル	28
3.1.1 A E計測系	28
3.1.2 A E特性	28
3.1.3 検 討	30
3.2 N S R R用インコネル718管	42
3.2.1 A E計測系	42
3.2.2 A E特性	42
3.2.3 検 討	43
4. 考察ならびに結言	49
参考文献	50

Contents

1. Introduction	1
2. Alternated internal pressure tests of Light Water Reactor pressure vessel model and Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) Inconel 718 tube	1
2.1 No.5 pressure vessel model	1
2.1.1 Test model	1
2.1.2 Static internal pressure test	3
2.1.3 Alternated internal pressure test	4
2.2 NSRR inconel 718 tube	20
2.2.1 Test tube	20
2.2.2 Static internal pressure test	20
2.2.3 Alternated internal pressure test	20
3. Measurement of acoustic emission characteristics in alternated internal pressure tests of LWR pressure vessel model and NSRR Inconel 718 tube	28
3.1 No.5 pressure vessel model	28
3.1.1 AE measurement system	28
3.1.2 AE characteristics	28
3.1.3 Discussions	30
3.2 NSRR Inconel 718 tube	42
3.2.1 AE Inconel 718 tube	42
3.2.2 AE characteristics	42
3.2.3 Discussions	43
4. Discussions and conclusions	49
References	50

1. 序 言

日本原子力研究所と電力中央研究所は、昭和48年度東京大学生産技術研究所の協力を得て、2体の圧力容器モデルについて内圧疲れき裂の伝播過程をA E法で調べる共同研究を実施した。その研究結果は既報の共同研究報告書「アコースティック・エミッション法による軽水炉圧力容器モデルの内圧疲れき裂伝播の追跡に関する研究」¹⁾（昭和49年6月）に報告したとおりである。

一方、上記共同研究の経験を踏まえ、昭和50年10月より次のような目的をもつ新たな共同研究「A E法による軽水炉圧力バウンダリの疲れき裂の発生、伝播挙動に関する研究」を進めることになった。すなわち、軽水炉圧力容器モデルおよびNSRR*用インコネル718管を用いて内圧繰返し試験を行ない、疲れき裂の発生と伝播特性をA E法によって調べると共に、他の計測法と比較検討し、軽水炉圧力バウンダリの安全性評価に必要な資料を蓄積する。

本報告は、上記の趣旨に従って実施した次の2種のA E試験の結果を取りまとめたものである。

- (1) ノズルコーナー内面に切欠きを付けた3個のノズルのある軽水炉圧力容器モデルの内圧繰返し試験。
- (2) 溶接部または母材部の表面に切欠きを付けたNSRR用インコネル718管の内圧繰返し試験。

2. 圧力容器および配管モデルの内圧繰返し試験

2.1. 第5号圧力容器モデル

2.1.1 供試体

原研に設置されている沸騰水型原子炉のJPDRは昭和38年8月に臨界に達し、その後運転を継続していたが、昭和41年5月の定期検査時に圧力容器の上蓋内側のクラッド部にヘア・クラックが検出された。発生の状況は、上蓋のフランジ部より上蓋内面に沿って、500～1,500mmにわたる手溶接部に生じており、自動溶接部にはほとんど発生していなかった。ヘア・クラックの長さは平均5～10mm程度のものが多く、最も長いもので25mmであった。ヘア・クラックの深さは、クラッド深さ6.4mmに対して表面より約2mm程度のものが最も多く、全体のほぼ70%を占めていた。なお、全部のヘア・クラックのうち、約5%がクラッドと母材との境界面近傍に達していたが、母材まで進展しているものはなかった。

* NSRR = Nuclear Safety Research Reactor

1. 序 言

日本原子力研究所と電力中央研究所は、昭和48年度東京大学生産技術研究所の協力を得て、2体の圧力容器モデルについて内圧疲れき裂の伝播過程をA E法で調べる共同研究を実施した。その研究結果は既報の共同研究報告書「アコースティック・エミッション法による軽水炉圧力容器モデルの内圧疲れき裂伝播の追跡に関する研究」¹⁾（昭和49年6月）に報告したとおりである。

一方、上記共同研究の経験を踏まえ、昭和50年10月より次のような目的をもつ新たな共同研究「A E法による軽水炉圧力バウンダリの疲れき裂の発生、伝播挙動に関する研究」を進めることになった。すなわち、軽水炉圧力容器モデルおよびNSRR*用インコネル718管を用いて内圧繰返し試験を行ない、疲れき裂の発生と伝播特性をA E法によって調べると共に、他の計測法と比較検討し、軽水炉圧力バウンダリの安全性評価に必要な資料を蓄積する。

本報告は、上記の趣旨に従って実施した次の2種のA E試験の結果を取りまとめたものである。

- (1) ノズルコーナー内面に切欠きを付けた3個のノズルのある軽水炉圧力容器モデルの内圧繰返し試験。
- (2) 溶接部または母材部の表面に切欠きを付けたNSRR用インコネル718管の内圧繰返し試験。

2. 圧力容器および配管モデルの内圧繰返し試験

2.1. 第5号圧力容器モデル

2.1.1 供試体

原研に設置されている沸騰水型原子炉のJ P D Rは昭和38年8月に臨界に達し、その後運転を継続していたが、昭和41年5月の定期検査時に圧力容器の上蓋内側のクラッド部にヘア・クラックが検出された。発生の状況は、上蓋のフランジ部より上蓋内面に沿って、500～1,500mmにわたる手溶接部に生じており、自動溶接部にはほとんど発生していなかった。ヘア・クラックの長さは平均5～10mm程度のものが多く、最も長いもので25mmであった。ヘア・クラックの深さは、クラッド深さ6.4mmに対して表面より約2mm程度のものが最も多く、全体のほぼ70%を占めていた。なお、全部のヘア・クラックのうち、約5%がクラッドと母材との境界面近傍に達していたが、母材まで進展しているものはなかった。

* NSRR = Nuclear Safety Research Reactor

以上のように J P D R 壓力容器の上蓋内面に検出されたヘア・クラックの問題に端を発して、もし同様のヘア・クラックが圧力容器胴体のノズル部内面コーナに発生していたと仮定したら、その後の J P D R の運転状態によってどのような伝播挙動を示すかが検討された。検討の結果、表 2.1.1 に示す 3 個の圧力容器モデルを製作し、内圧繰返し試験を実施して J P D R の使用期間中にその健全性が保持されるかどうかを実証することとなった。3 個の圧力容器モデルは胴部の直径比で J P D R 本体の約 $\frac{1}{3}$ (第 1 号) , $\frac{1}{3}$ (第 2 号) および $\frac{1}{2}$ (第 3 号) であり、設計は表 2.1.1 に示すように第 1 号および第 2 号モデルは ASME Boiler and Pressure Vessel Code の Sec. VII に基づいて行い、第 3 号モデルは Sec. III に基づいて行った。各モデルに取りつけたノズルの寸法は表 2.1.1 に示すとおりであるが、ノズル部内面は実機にほぼ近い条件とするため、手溶接によってステンレス鋼肉盛を行った。クラッド部の細部寸法も同表に示すとおりである。

3 個の圧力容器モデルに静的内圧を負荷したときのノズル内面コーナ部における最大歪、最大応力および応力集中係数等を表 2.1.2 に示す。なお、内圧負荷は常温で油を用いて実施した。静的内圧負荷試験を実施したのち、表 2.1.3 に示すように、ノズル部内面コーナの最大応力発生点に人工欠陥(切欠き)を加工し、静的負荷圧力を最高圧力として内圧繰返し試験を行った。内圧繰返し試験時には、切欠きからのき裂の伝播長さをスマックゲージ法(電位差法)、き裂ゲージ法および超音波探傷法等を用いて測定し、き裂がノズル部を貫通するまで試験を行った。試験結果として、第 1 号モデルは最大圧力 120 kg/cm^2 で約 24,700 サイクル、第 2 号モデルは最大圧力 150 kg/cm^2 で約 22,200 サイクルおよび第 3 号モデルは最大圧力 110 kg/cm^2 で約 33,000 サイクルの内圧繰返し試験を実施したのち、ノズル部をき裂が貫通して油が漏洩した。

が貫通して油が漏洩した。

以上の試験結果から、J P D R の使用期間中における原子炉の起動・停止およびスクラム時等による内圧繰返し数を 150 サイクルとすると、実機の使用条件とは異なる試験条件を考慮しても J P D R の圧力容器の健全性は十分保持されるという結論を得た。²⁾

一方、表 2.1.4 に示すように第 4 号モデルは第 1 号モデルを改造し、直径の異なる一般軽水炉圧力容器ノズルを 4 個取りつけて、第 1 号モデルと同一条件で内圧繰返し試験を実施した。第 4 号ノズルについては、表 2.1.4 に示すように、ノズル部におけるき裂の伝播長さはスマックゲージおよびき裂ゲージのほか、電力中央研究所および東京大学生産技術研究所と原研との共同研究に基づいて、Acoustic Emission (AE) 法も用いて測定を行った。これらの試験結果から、ノズル部におけるき裂の伝播速度はノズル径と圧力容器径との比に依存することが明らかとなった。

第 5 号モデルは第 3 号モデルにすでに取りつけてあった 3 個の一般軽水炉圧力容器用ノズルを用いて、第 3 号モデルと同一条件で内圧繰返し試験を実施した。ただし、第 3 号モデルとしての試験時には、3 個のノズルの内面コーナには切欠きを加工せずに内圧繰返し試験を行ったが、最大応力発生点にはき裂の発生は観察されなかった。したがって、第 5 号モデルについては、第 3 号モデルとしての試験時にすでに繰返し内圧を受けたノズル内面コーナに切欠きを加工して、内圧繰返し試験を実施した。

供試した第5号圧力容器モデルの断面図を図2.1.1に示す。既述のように、第5号モデルに取りつけた4個のノズルのうち、J P D R圧力容器用ノズル1個を除いた3個のノズルは一般軽水炉圧力容器用ノズルである。この3個のノズルは電気出力80～100万kW級の沸騰水型原子炉圧力容器に取りつけるために設計されたものであり、原寸の約 $\frac{1}{6}$ のモデルである。これらのノズルの断面図を図2.1.2、2.1.3および2.1.4に示す。3個のノズルの名称をそれぞれT-N、H-NおよびN-Nで表わす。これらのノズルは図2.1.1の圧力容器モデルの断面図に示したA-A断面の同一円周上に、90°づつらして取りつけられた。

表2.1.5(1)および(2)に圧力容器モデル本体およびノズル用素材の機械的性質と化学成分を示す。同表から明らかのように、本体は低合金鋼のASTM Type A302Gr.Cから製作され、一方ノズルはASTM Type A336改良鍛造鋼から製作された。なお、J P D R圧力容器用ノズルについては、実機を模擬してノズル内面コーナのみステンレス鋼肉盛溶接を行ったが、他の3個のノズルについては肉盛溶接は行わず、母材のままで試験を実施した。

2.1.2 静的内圧試験

第5号モデルは前述のように、第3号モデルとして最大圧力110kg/cm²の繰返し内圧が約33,000サイクル負荷されている。したがって、同モデルに取りつけた3個のノズルの内面コーナでは、切欠きを加工しない状態で約33,000回の応力一ひずみサイクルを受けたことになる。図2.1.5に第3号モデルとして3個のノズル部内面コーナに切欠きを加工しない状態で受けた繰返し内圧試験の履歴を示す。同図に示すように、昭和45年5月21日に切欠きを加工しない状態で段階的に内圧を負荷しながら、110kg/cm²まで静的内圧負荷試験を実施した。この場合に、圧力容器モデルの各部における応力分布を調べるために、電気抵抗線型ひずみゲージを必要箇所に貼付してひずみを測定した。特に、最大応力の発生するノズル部の内面コーナには、他の位置に比較して多くのひずみゲージを貼付して綿密なひずみ測定を行った。図2.1.6、2.1.7および2.1.8にT-N、H-NおよびN-Nノズルの内面コーナにおける応力分布を示す。これらの応力値は、応分とひずみの関係が直線関係、すなわち弾性挙動を示すと仮定して求めた。ここで、弹性係数としてE=2.1×10⁴kg/mm²、ポアソン比としてν=0.3を用いた。なお、図2.1.8に示すように、N-Nノズルについては日立製作所原子部で実施した計算値と本試験から得られた実験値との比較を行った。同図から明らかのように両者はほぼ一致している。3個のノズルとも内面コーナにおいて、高い円周方向応力が発生している。この円周方向応力は、いずれのノズルの場合も圧力容器胴体の軸方向断面上に生じ、胴部内面における公称円周方向応力の2.0倍以上の値となっている。表2.1.6にT-N、H-NおよびN-Nノズルの内面コーナにおいて求めた応力集中係数（最大円周応力/公称円周応力）を示す。同表から明らかなように、H-Nノズルは他の2個のノズルに比較してやや低い値となっているが、平均して2.4以上の高い応力が生じている。また、これらの結果から、3個のノズルの内面コーナにおける応力集中係数はほとんど差がないと考えてよいであろう。

2.1.3 内圧繰返し試験

各ノズルの内面コーナに切欠きを加工しない状態で静的内圧負荷試験を実施したのち、内面コーナの最大応力発生点に人工切欠きを加工した。切欠きはき裂の伝播挙動に及ぼす形状効果を調べるため、A型およびB型の2種類とした。この2種類の切欠きは図2.1.2, 2.1.3および2.1.4に示すように、圧力容器胴体の軸方向同一断面上の対称の位置に加工した。A型およびB型のいずれも切欠きの深さは約3mmとしたが、A型は切欠き底を直線状、B型はそれを円弧状とした。

内圧繰返し試験は、最大圧力 110 kg/cm^2 の繰返し内圧とし、1分間に約5サイクルの割合で負荷した。内圧繰返し試験中は、各切欠きの対称の位置に2対づつスポット溶接で取りつけたスマックゲージを用いて、各ノズル断面の深さ方向（圧力容器胴体の内表面に対して約 45° 方向）のき裂長さを連続して計測した。また、圧力容器胴体の内表面およびノズル部内表面におけるき裂の伝播長さは、各切欠きの先端に貼付したき裂ゲージを用いて、内圧繰返し試験中連続して計測した。図2.1.9に一例として、T-NノズルのA型切欠き底から、内圧繰返し試験中にスマックゲージおよびき裂ゲージによってき裂伝播長さを測定した結果を示す。

同図から明らかのように初期の段階では、 45° 方向のき裂の伝播が早くすすむが、中期以降は圧力容器胴体およびノズル部の内表面においてき裂の伝播速度は速くなっている。この理由は切欠き底の応力場の影響を受けて、初期段階ではほぼ2次元状の応力分布（内圧負荷時に切欠きに対して直角方向に作用する応力）によって切欠き底の 45° 方向にはき裂が早くすすむことが考えられる。一方、内表面においては、切欠き底の先端と内表面の交差する位置で3次元状態の複雑な応力分布のため、き裂進展に対して拘束を受けて速度がおそくなることが考えられる。中期以降は、初期段階とは逆に内表面において、円周方向の引張応力によって 45° 方向よりき裂が早くすすむと思われる。

図2.1.10にT-N, H-NおよびN-Nノズルの圧力容器胴体内表面におけるき裂の伝播長さをき裂ゲージを用いて測定した結果を示す。同図でH-Nノズルにおけるき裂の伝播速度が、他の2個のノズルの場合に比較しておそいのは、ノズル内面コーナにおける応力分布および応力集中係数の影響を受けたためと思われる。すなわち、図2.1.6, 2.1.7および2.1.8の各ノズルの内面コーナにおける円周方向の応力分布から明らかのように、H-Nノズルの場合は他の2個のノズルに比較して最大応力値が低くなっている。また、T-NノズルとN-Nノズルのき裂伝播速度で、前者が後者に比較して速いのは、図2.1.6および2.1.8から明らかなように、T-Nノズルの応力分布がN-Nノズルのそれに比べて応力値の減衰が小さい。したがって、ノズルコーナ部におけるき裂の伝播速度は、内面コーナにおける円周方向引張応力の応力集中係数が高いほど、またその応力分布の減衰が小さいほど速くなることがわかる。

ノズルコーナ部におけるき裂の伝播は、スマックゲージおよびき裂ゲージによって計測を行うとともに、ノズル近傍の外表面に取りつけたAE計測用センサを用いて外部から計測を実施した。また、試験終了後ノズルの破断面のストライエーション（Striation—条痕）を測定してき裂伝播速度を求めた。前者については、第3章で詳細に述べられる。後者の結果から、スマックゲージによって求めたき裂伝播速度とほぼ同じ値が得られた。一例としてT-Nノズルについて両者を比較したものを図2.1.11に示す。同図から明らかのように、ノズルコ

ーナ部におけるき裂の伝播速度は、き裂長さとともに増加するが、その値は1サイクル当たり 10^{-3} mm オーダの伝播速度であることが明らかとなった。本試験は常温で油によって実施したので、実機の使用条件とは異なっている。したがって、実機のノズル部におけるき裂の伝播速度を知るためには、環境条件をさらに考慮する必要がある。

第5号圧力容器モデル試験の結果をまとめれば以下のとおりである。

- 1) 切欠きなしの状態でのノズル内面コーナの応力分布は、コーナ部にテーパがついているほど円周方向引張応力の減衰は小さい。また、応力集中係数は3個のノズルについて大きな差異はないが、3個のノズルの値を平均すると約2.4となった。
- 2) き裂の伝播速度はノズル内面コーナにおける円周方向引張応力の応力集中係数が大きいほど、またその応力分布の減衰が小さいほど速くなる。
- 3) ノズル部におけるき裂の伝播速度は1サイクル当たり約 10^{-3} mm オーダの値となった。
- 4) ノズル部の深さ方向の伝播速度は、スマックゲージによって求めた値と破断面から求めたストライエーションによる値とほぼ一致した。

表 2.1.1 J P D R 壓力容器および同モデルの主要諸元

	No.1	No. 2	No. 3	JPDR P.V.
Design code, ASME	Sec. VIII	Sec. VIII	Sec. III	Sec. VIII
Scale	1/3	1/3	1/2	1
Shell length,	(mm)	2,000	2,000	Length 8,047
Inner diameter,	(mm)	695	695	1,048 2,083
Wall-thickness,	(mm)	23	23	26 67
Nozzle length,	(mm)	313	318	407 585
Inside diameter,	(mm)	94	94	140 281
Wall-thickness,	(mm)	23.5	23.5	37 73
Overlay diameter,	(mm)	200	200	300 -
Thickness,	(mm)	3	3	3 6.4
Nozzle corner radius (excluding clad),	(mm)	10R	10R	15R 20R

表 2.1.2 圧力容器モデルの静的内圧負荷試験結果

Pressure vessel model	No. 1	No. 2	No. 3	JPDR P.V.
Scale	1/3	1/3	1/2	1
Loading pressure (Kg/cm ²)	120	150	110	65.5 (operating pressure)
Inside circumferential stress in shell (experimental), (Kg/mm ²)	18.5	22.6	20.6	10.5 (calculated)
Circumferential strain in nozzle corner (10)	2,443	2,950	2,420	
Circumferential strain in nozzle corner (range)	51.4	62.0	48.5	24.3 (presumed)
Circumferential stress amplitude in nozzle corner (Kg/mm ²)	25.7	31.0	24.5	12.2
Stress concentration factor in nozzle corner	2.8	2.7	2.4	2.3

表 2.1.3 圧力容器モデルの内圧繰返し試験時の試験条件

Pressure vessel Model No.	No. 1	No. 2	No. 3	JPDR P.V.
Repeated internal pressure, (kg/cm^2)	120	150	110	65 (operating pressure)
Repeated internal pressure rate, (cpm)	5, 8, 10	3, 5, 8	3	50/year (presumed)
Machined notch length, (mm)	40	40	30	60
root radius, (mm)	0.15	0.15	0.11	Natural crack
depth (mean), (mm)	3.2	1.6	1.5	6
Notch stress concentration factor (calculated)	8 to 9	6 to 7	8 to 9	

表 2.1.4 圧力容器モデルの内圧繰返し疲労試験の概要

圧力容器 モデル番号	試験目的	スケール	試験用 ノズル数	き裂の伝播速度の 測定方法	設計基準
1号	JPDR圧力容器 ノズル部の健全性 の実証試験	JPDR圧力 容器の $\frac{1}{3}$ モデル	2	き裂ゲージ スマックゲージ	ASME Code Sec. VIII
2号	同上	同上	2	同上	Sec. VIII
3号	同上	JPDR圧力 容器の $\frac{1}{2}$ モデル	4	同上	Sec. III
4号	一般軽水炉用圧力 容器ノズル部の健全 性の実証試験	第1号圧力容器 モデルの改造	4	き裂ゲージ スマックゲージ AE法(電力中研) (東大生研)	Sec. VIII
5号	同上	第3号圧力容器 モデルの改造	3	同上 AE法(電力中研)	Sec. III

表 2.1.5(1) 第5号圧力容器モデル素材の機械的性質および化学成分

〔機械的性質〕

Specification Production No.	Extracted position	Yield strength (MN/m ²)	Ultimate tensile strength (MN/m ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Bend test	Charpy V- notch impact test (N.m)
4K 1623 1/13	Top	343	549/686	17		180° R = 1.25t	Average 33.3(N.m) Minimum 26.5 (at -12°C)
	Bottom					Good	Longitudinal average 110 115, 106, 110 Transverse average 60.8 60.8, 57.9, 63.7
		587	685	20			

〔化学成分(%)〕

She11 ASTM A302GradeC	Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Specification	0.20	0.15/0.30	1.15/1.50	0.035	0.040	0.40/0.70	—	0.45/0.60	
Ladle analysis	0.19	0.29	1.28	0.014	0.015	0.57	—	—	0.51

表 2.1.5(2) 第5号圧力容器モデルのノズル素材の機械的性質および化学成分

〔機械的性質〕

Specification Material number	Yield strength (MN/m ²)	Ultimate tensile strength (MN/m ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Bend test	Charpy V- notch impact (N.m)
343	549	20				Average 33.3 Minimum 26.5 (at -12°C)
45 E 253 2/3 2-5	453	608	27.9	69.4		Average 155.9 160.8, 143.2, 163.8

〔化学成分(%)〕

Nozzle T-N, H-N, N-N ASTM A336 modified ASME case 1236-3	Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Specification	0.27	0.15/0.35	0.50/0.80	0.040	0.050	0.50/0.90	0.25/0.45	0.55/0.70	
Ladle analysis	0.18	0.32	0.69	0.008	0.013	0.88	0.32	0.62	

表 2.1.6 各ノズル内面コーナにおける応力集中係数

Nozzle	T-N	H-N	N-N
Circumferential stress of inner surface of shell (kg/mm ²)	202	202	202
Circumferential stress of inner corner surface of nozzle (kg/mm ²)	495	456	517
Stress concentration factor of inner corner surface of nozzle	2.5	2.3	2.6

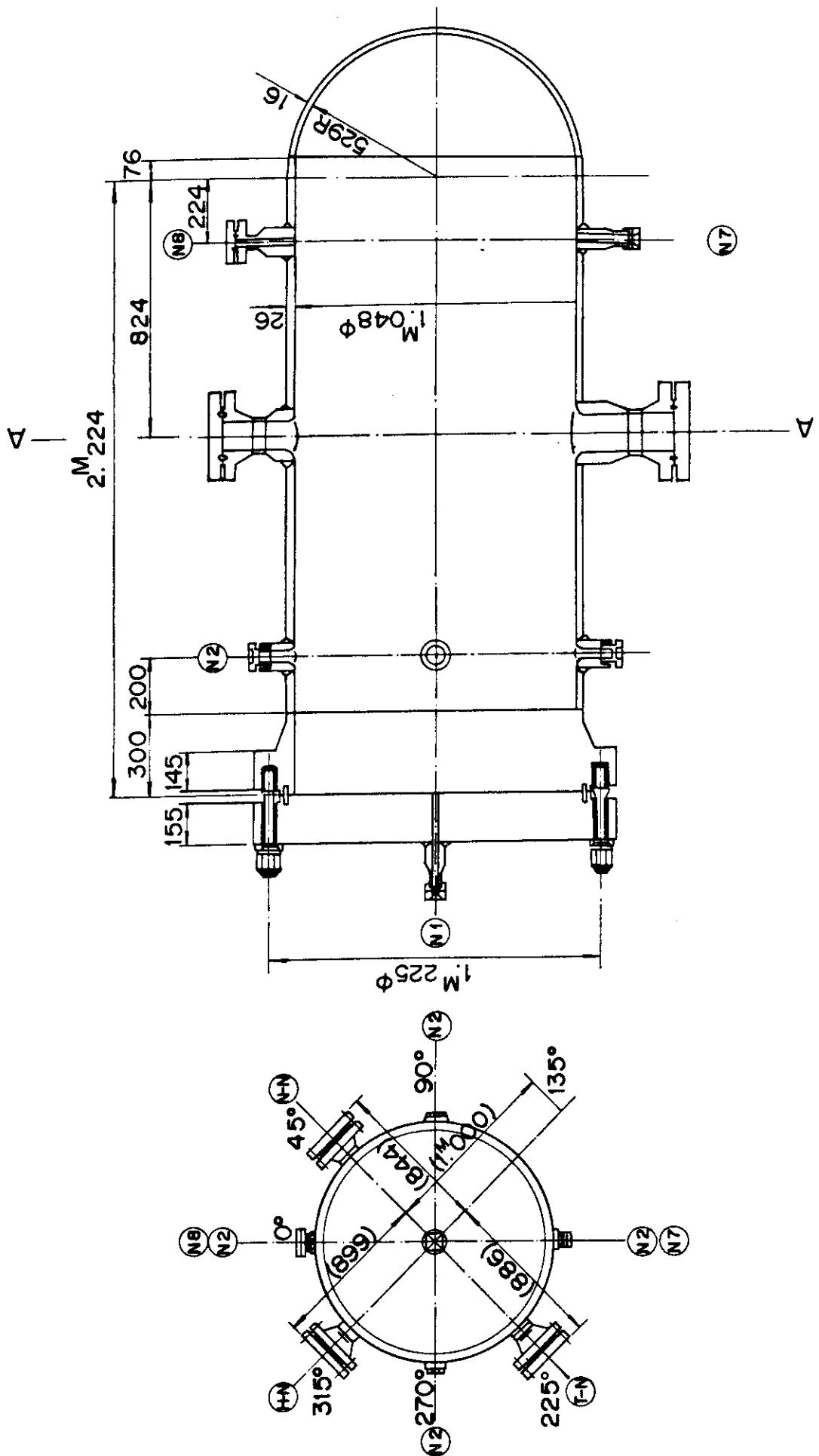


図 2.1.1 第 5 号 壓力容器 モデル 断面図

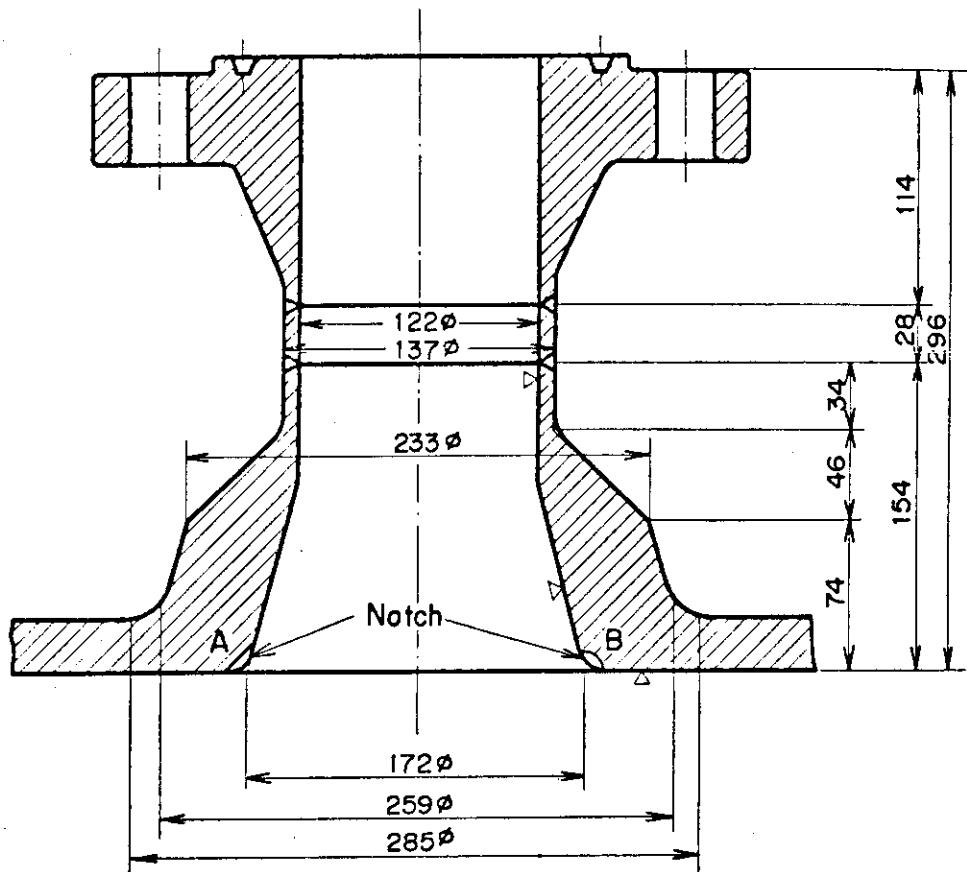


図 2.1.2 T - N ノズルの断面図

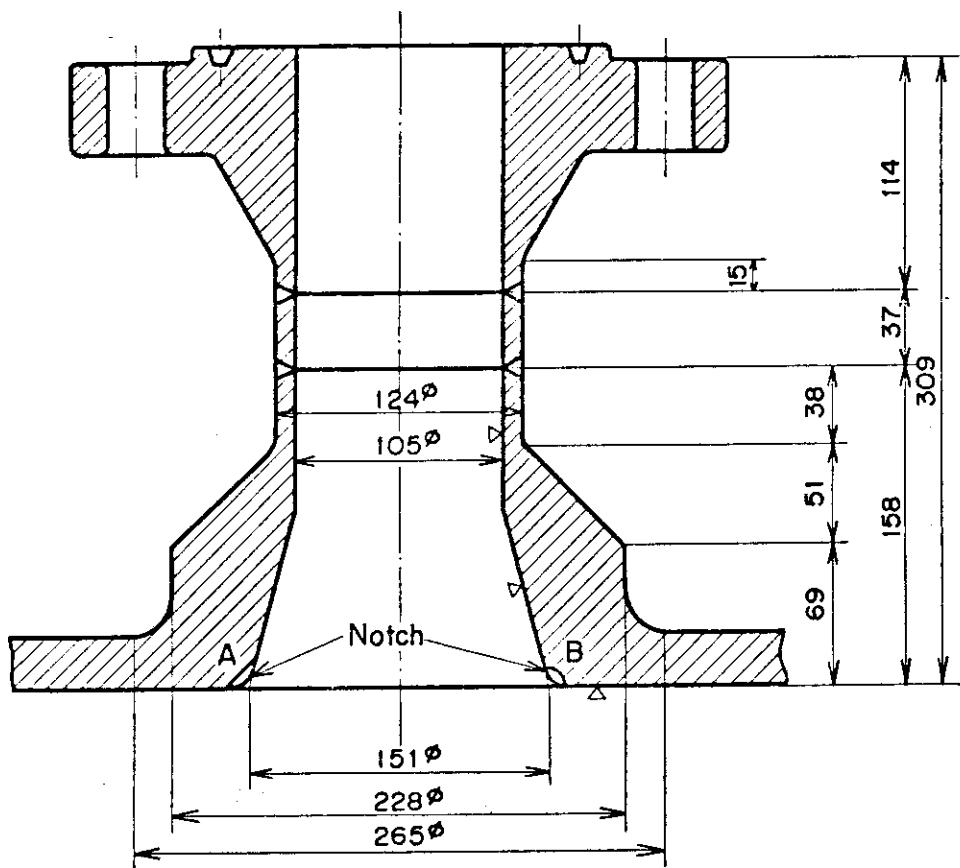


図 2.1.3 H - N ノズルの断面図

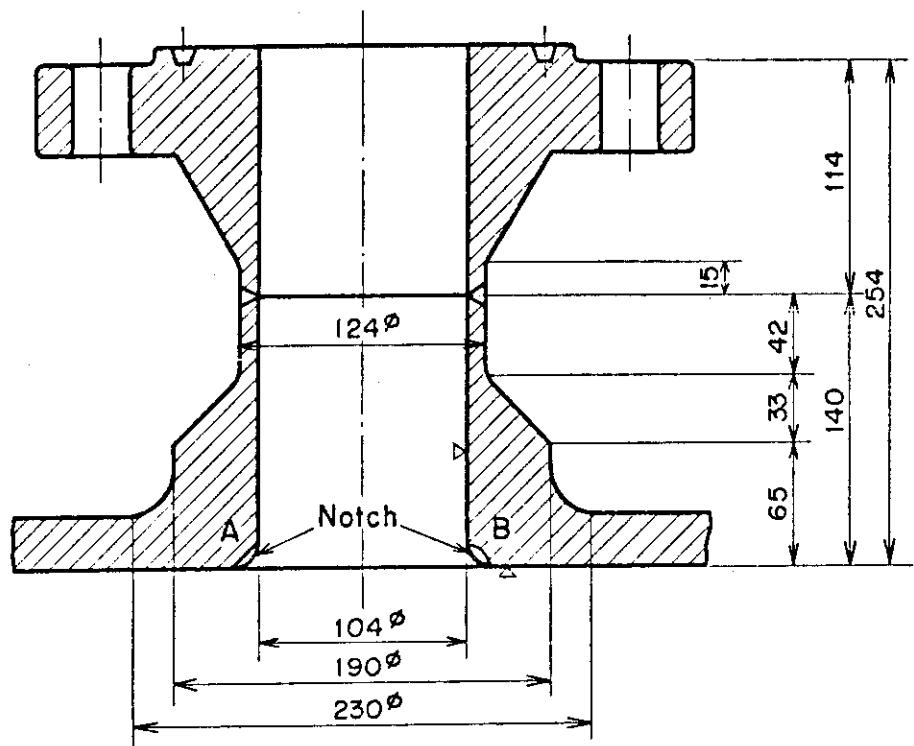


図 2.1.4 N - N ノズルの断面図

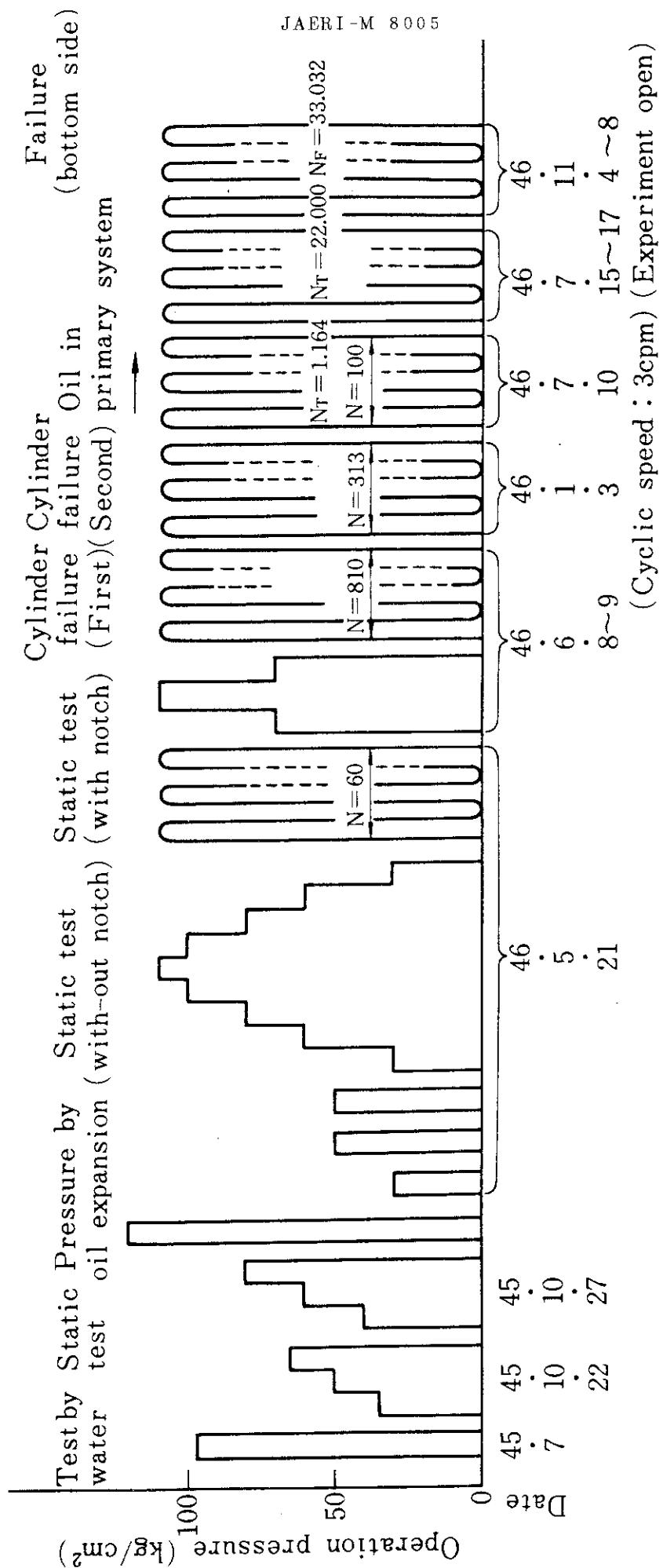


図 2.1.5 第5号モデルのノズル内面コーナに切欠きのない状態での内圧繰返し負荷試験履歴

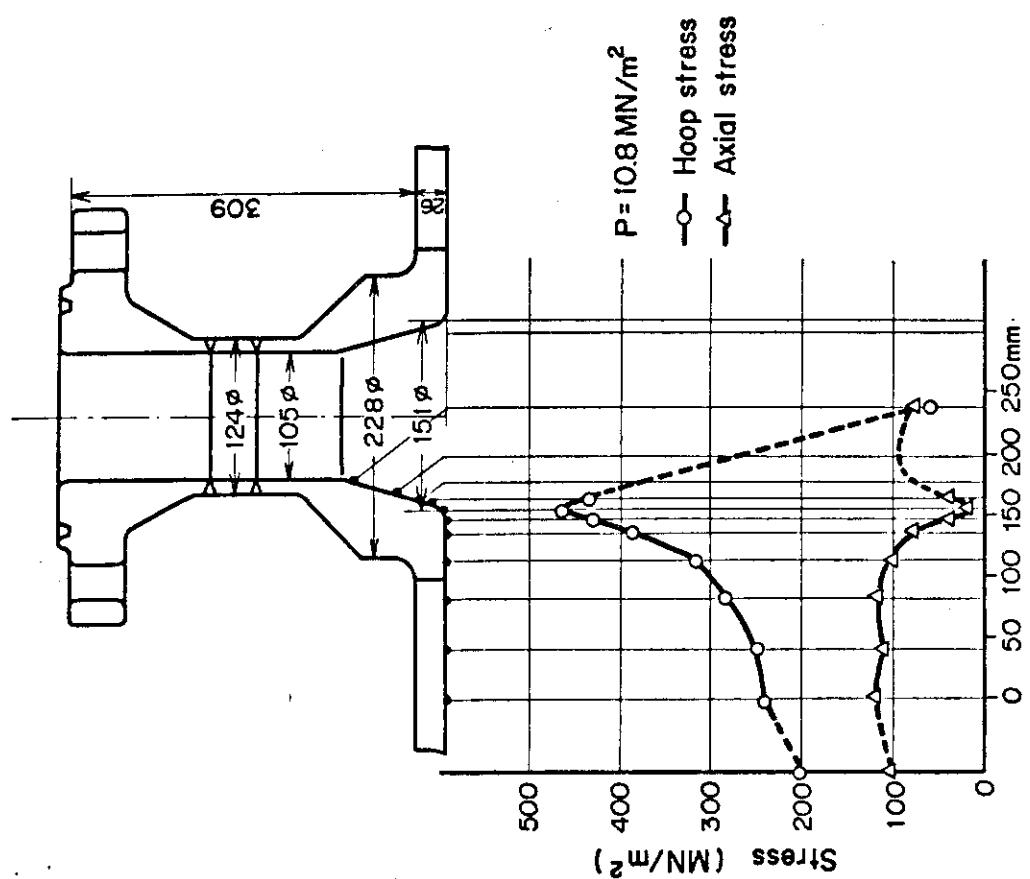
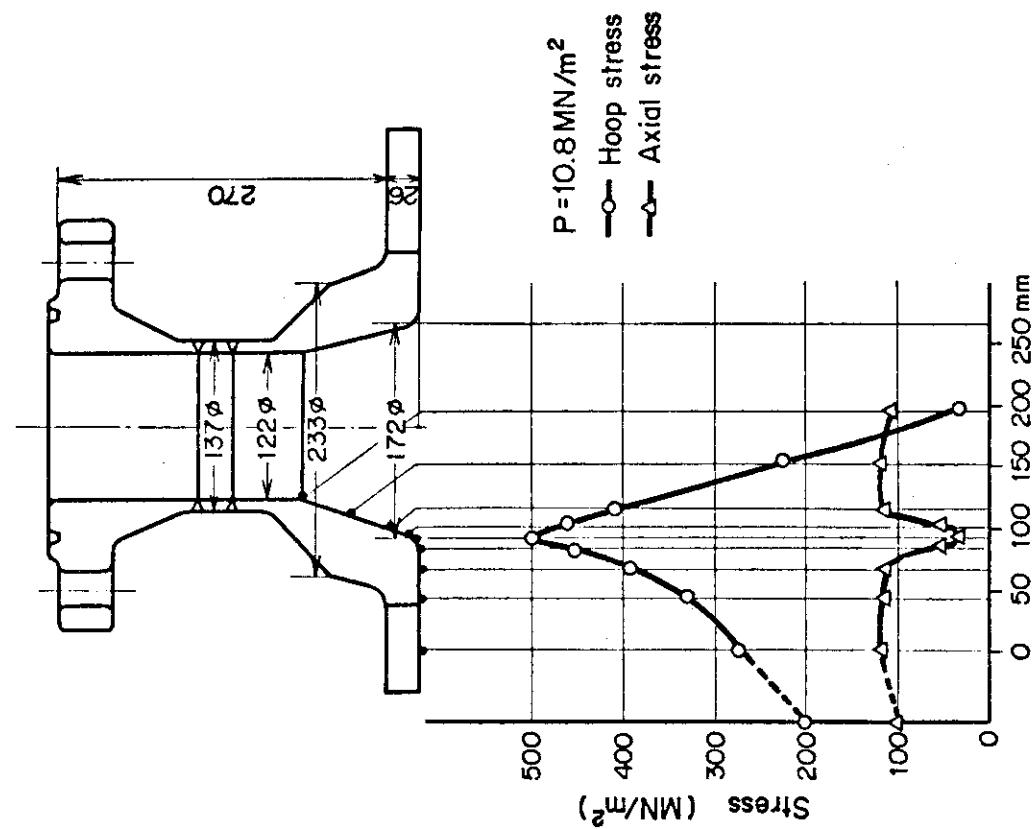


図 2.1.6 T-N ノズルの内面コーナにおける応力分布

図 2.1.7 H-N ノズルの内面コーナにおける応力分布



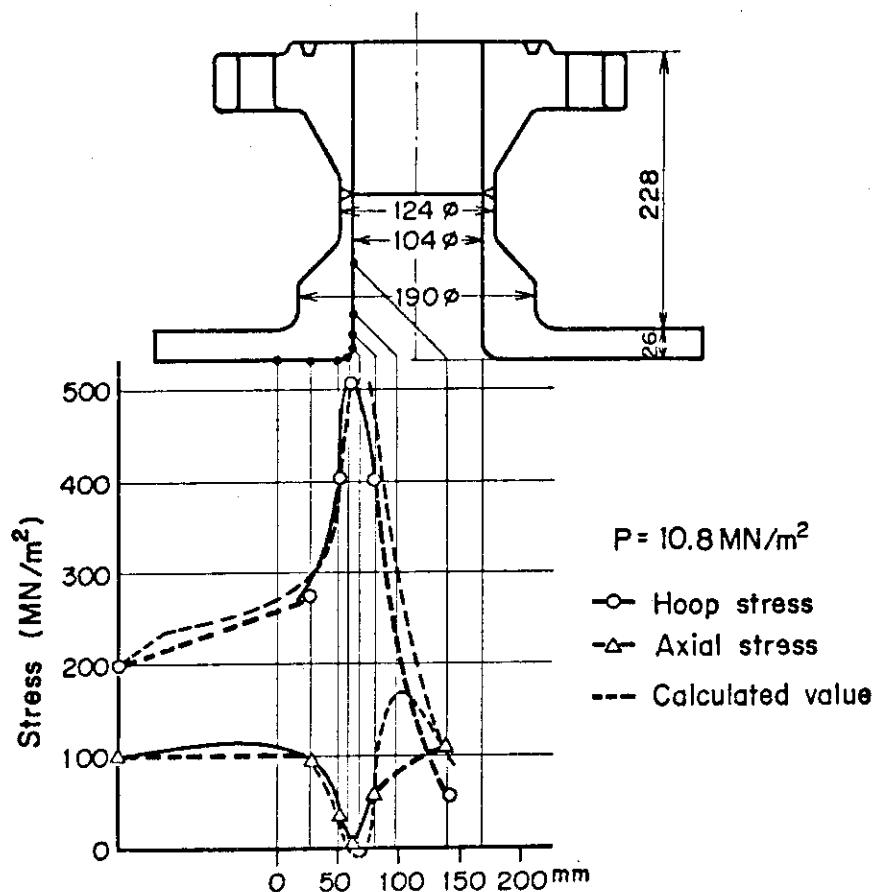


図 2.1.8 N-N ノズルの内面コーナにおける応力分布

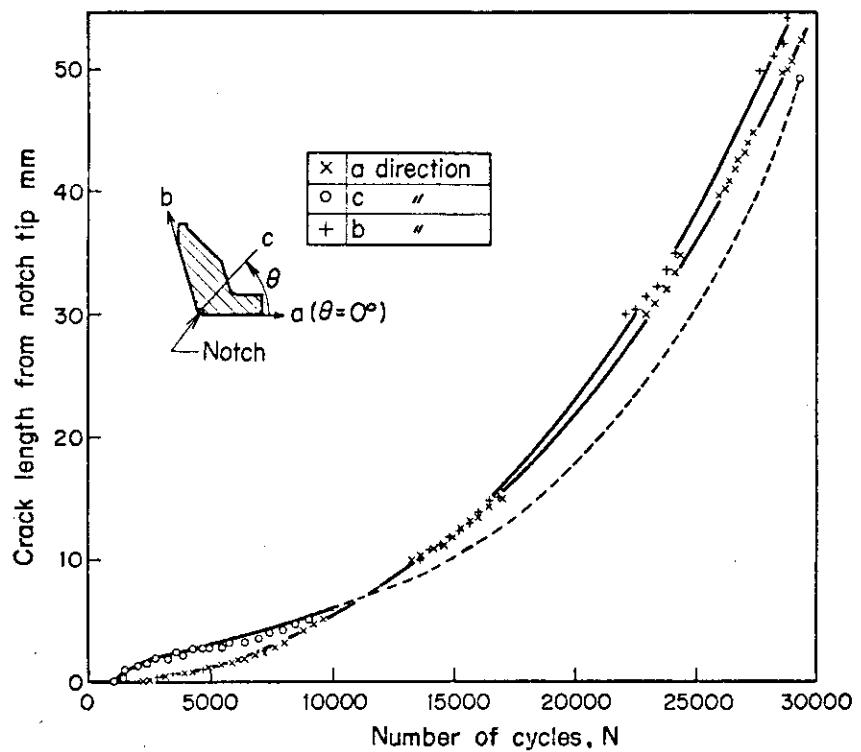


図 2.1.9 T - N ノズルの切欠き底からのき裂伝播長さ (A型切欠き)

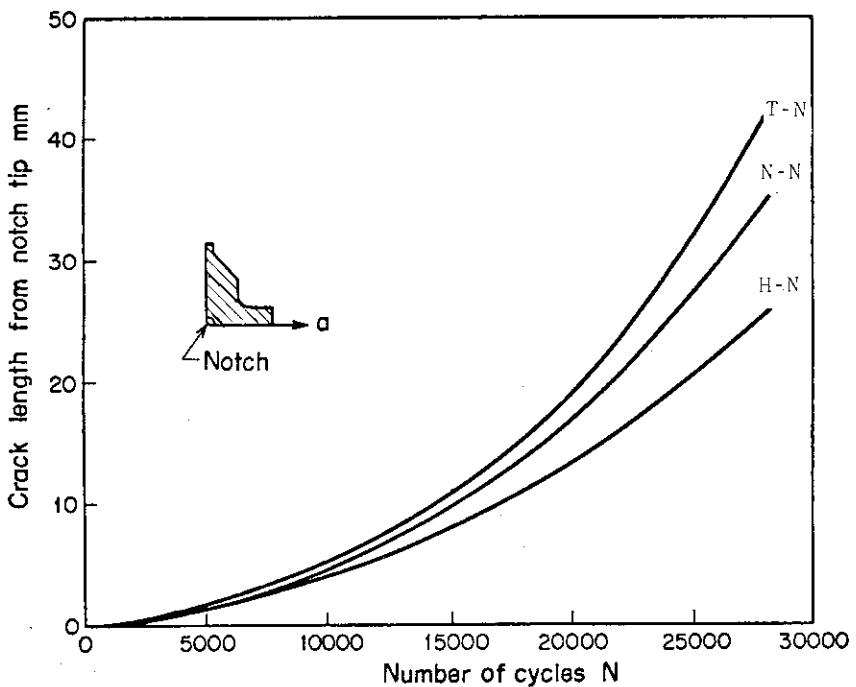


図 2.1.10 T - N, H - N および N - N ノズルの圧力容器胴体内表面におけるき裂伝播長さ

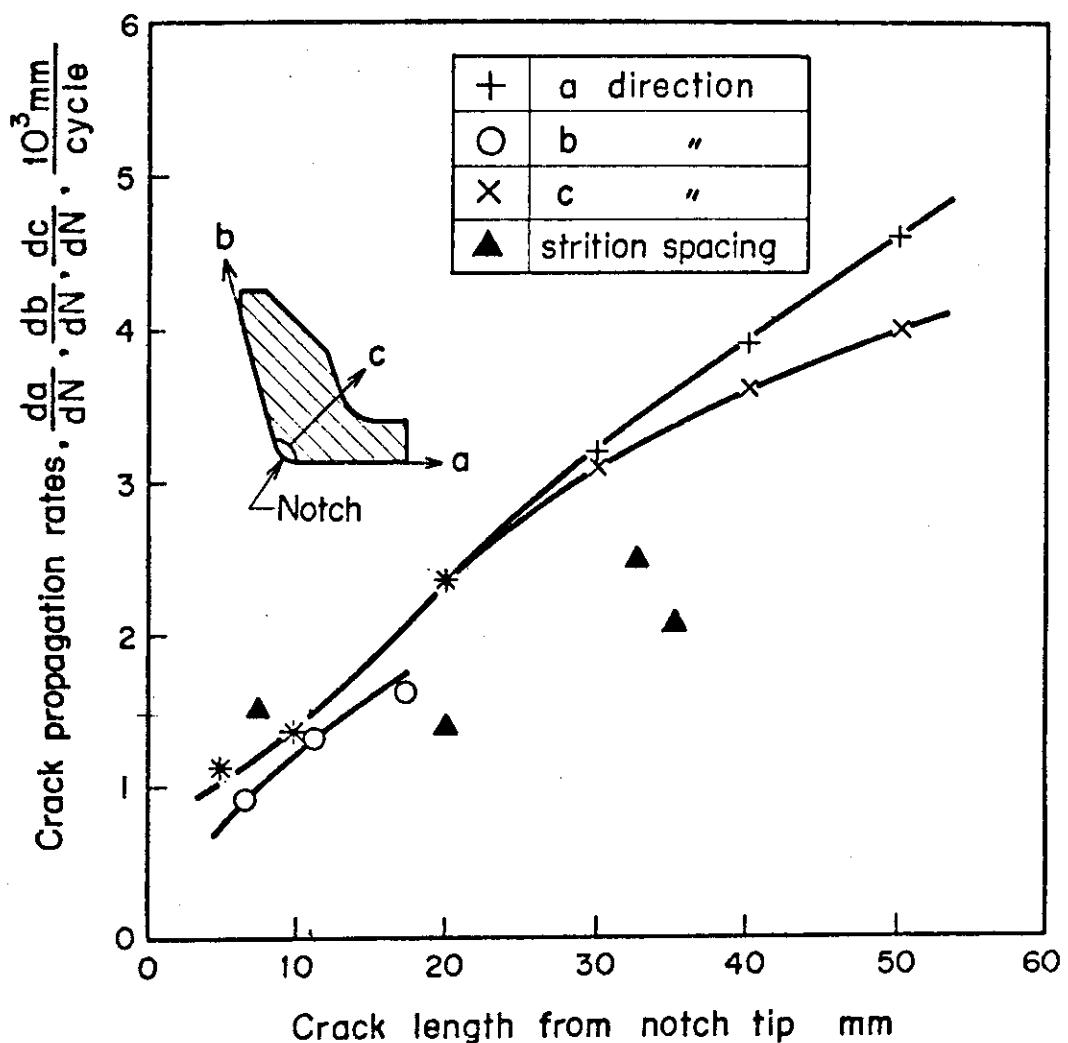


図 2.1.1.1 T - N ノズルにおけるき裂伝播速度
(A型切欠き)

2.2 NSRR用インコネル718管

2.2.1 供試体

NSRRにおける燃料破損実験では燃料破損による核分裂生成物の飛散を封じ込めるため、破損燃料収納容器としてインコネル718管カプセル内に試験燃料を封入して実験が行われる予定である。燃料破損実験では燃料破損に伴ってカプセル内にパルス圧力が発生するので、カプセルはこの負荷に対して強度的に十分耐え得るものでなければならない。

本研究におけるインコネル718製カプセルの実寸大モデルの内圧繰返しによる疲れき裂伝播試験では、同モデルに繰返し内圧が負荷される場合のカプセルの欠陥ないしはキズから発生する疲れき裂を想定し、疲れき裂の伝播挙動に関して内圧繰返し試験法による実験を行い、き裂伝播特性を調べた。

カプセルモデルに使用されるインコネル管は継手であるので溶接部強度はカプセルの強度を評価するうえで非常に重要である。そこで以上の実験では母材部の実験No.4とともに溶接部（溶接金属）の実験No.5を行い溶接部の強度を検討した。

供試体には長手方向に溶接継手を有するインコネル718管を使用した。供試体の機械的性質と化学成分を表2.2.1に示す。また供試体は1150°Fの熱処理が施されている。

試験に用いた試験体は上記の外径133mmの素管から機械加工し、製作した。図2.2.1に試験体の形状および寸法を示す。なお、人工き裂は13mmφ×0.3mmTのダイヤモンドカッターにより加工した。

この試験体の外径、肉厚については試験の際十分な繰返し応力を負荷するため、外径127mmφ肉厚3.0±0.05mmの決定した。試験体は試験部が約340mmありその両側にねじ込み式フランジが取付けられる構造となっている。

2.2.2 静的内圧試験

内圧繰返し試験は電気-油圧閉ループ制御式の内圧繰返し試験装置を使用して試験を行った。試験はすべて室温、大気中で行った。また、加圧媒体には#60ターピン油を使用し、繰返し速度は0.5Hzで実験した。加圧波形には正弦波を用いた。

繰返し試験に先立ち静的内圧負荷による静的試験を行ったが、この試験でも同じ試験装置を使用した。この静的試験では試験体の中央（き裂と180°の位置）に歪ゲージを貼付して歪測定を行い、歪と圧力の関係について調べた。図2.2.2に圧力と周歪の関係および圧力と軸歪の関係をそれぞれ示す。同図からわかるように各試験の測定結果とも直線となっており弾性挙動を示している。

2.2.3 内圧繰返し試験

内圧繰返し試験条件は内圧を $19.5 \leftrightarrow 195 \text{ kg/cm}^2$ であり、人工的に付加した表面き裂が管厚を貫通するまで内圧繰返し負荷を行った。

深さ方向のき裂進展は、スマックゲージ法（電気抵抗法）によって測定した。その測定の概要と較正曲線を図2.2.3に示す。較正曲線は供試体と材質および形状寸法とも同一の試料を用

いて求めた。

き裂伝播試験より得られたき裂寸法と繰返し数の関係を図 2.2.4 に示す。また、図 2.2.5 に表面き裂の場合のき裂深さとき裂伝播速度との関係を示す。同図の母材の場合、き裂進展の初期においてバラツキがみられるが、き裂進展とともにき裂伝播速度が高くなっているのがわかる。なお、き裂伝播速度の計算は連続した測定点 5 点を選び、この 5 点の繰返し数 N とき裂寸法との関係を 2 次式にフィッティングし、中心の測定点における勾配を計算することにより各測定点のき裂伝播速度を求めた。

応力拡大係数 (Stress Intensity Factor, K-factor) はき裂先端の応力状態を表わす量として広く知られているが、疲れき裂伝播速度はこの K-factor をパラメータとして種々の数式モデルが提案されている。そこで、実験結果についてき裂伝播速度 (da/dN または dc/dN) と K の関係を描いたのが図 2.2.6 である。同図においては、K 値は次のようにして求めた。すなわち、平板に表面半だ円き裂があり、無限遠方で一様荷重が作用している場合の K 値について、P.C.Paris が与えており³⁾、曲板に表面半だ円き裂があり一様荷重が作用している時の応力拡大係数とは大差ないと考えられるので、ここでは P.C.Paris の式により表面き裂の場合の K - factor を計算した。

すなわち、

$$K = \left\{ 1 + 0.12 \left(1 - \frac{c}{a} \right) \right\} \cdot \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\phi_0} \cdot \left\{ \frac{2t}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{2t} \right\}^{1/2}$$

ここで、a : き裂半長

c : き裂深さ

t : 板厚

ϕ_0 : 第 2 種完全だ円積分

インコネル 718 管の内圧疲れ試験結果をまとめれば、以下のとおりである。

1. 母材の貫通き裂および表面き裂の伝播において伝播速度に差が見られた。

この差は表面き裂の K - factor の誤差等に基づくと考えられる。溶接部のき裂伝播においてもほぼ同様の差が生じていた。

2. 母材と溶接部の伝播速度を比較すると、溶接部では母材より約 2.5 倍高い伝播速度を示し、溶接施工により材質の脆化あるいは溶接残留応力等が生じている可能性がある。

3. バースト実験の結果では明らかに溶接部の破壊靄性値が母材より低くなっている。

4. 表面き裂のバースト実験ではき裂はき裂底部より発生すると考えられるが、この際 K - factor は一旦低下するはずである。しかし、この K - factor の低下にもかかわらずき裂は停止せず進展が継続する。この事実はき裂停止条件は破壊発生条件より低いと一般に言われてることと一致し、一旦発生した動的き裂の進展は止まりにくいことを示している。

表 2.2.1 供試体の機械的性質と化学成分

〔機械的性質〕

引張強さ	耐力	伸び	硬さ
141.3 kg/mm ²	111.1 kg/mm ²	20 %	RC 42

〔化学成分〕

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
.06	.09	.005	.005	.06	18.00	52.15	.01

Cb/Ta	Mo	Co	Fe	Aℓ	Ti	B
5.08	3.05	.09	bal	.49	.99	.005

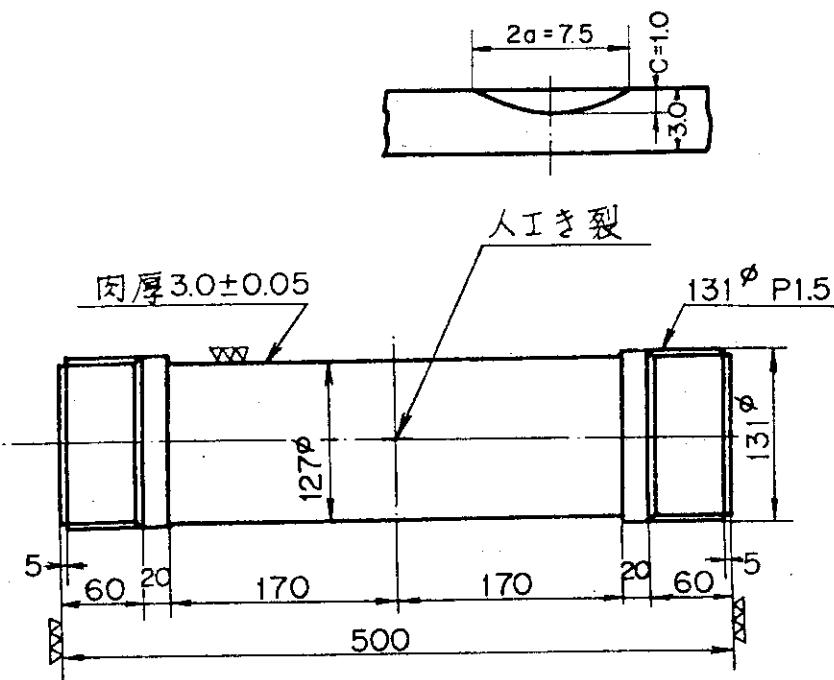


図 2.2.1 インコネル 718 管内圧疲れ試験体

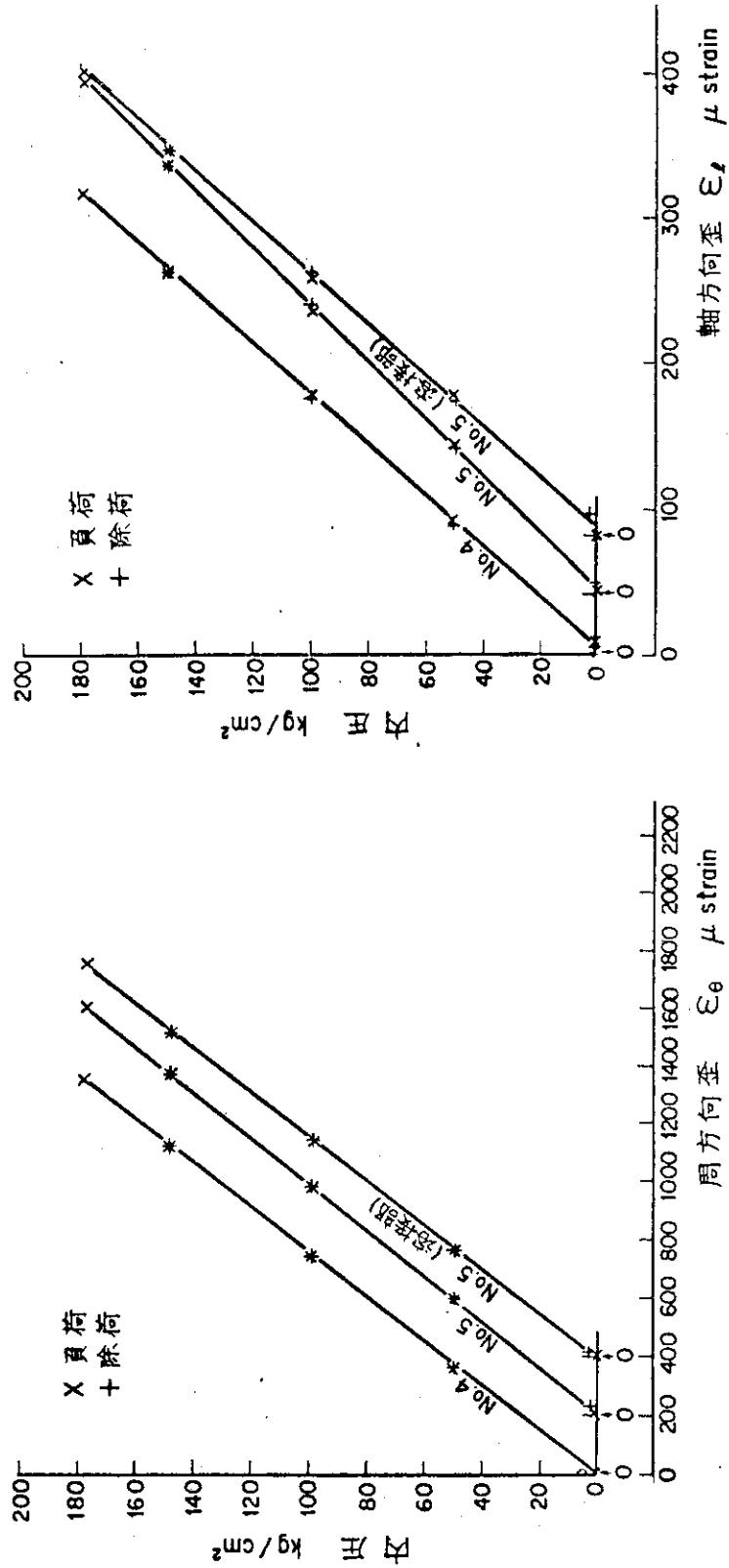


図 2.2.2 歪測定結果(試験前, Static pressure test)

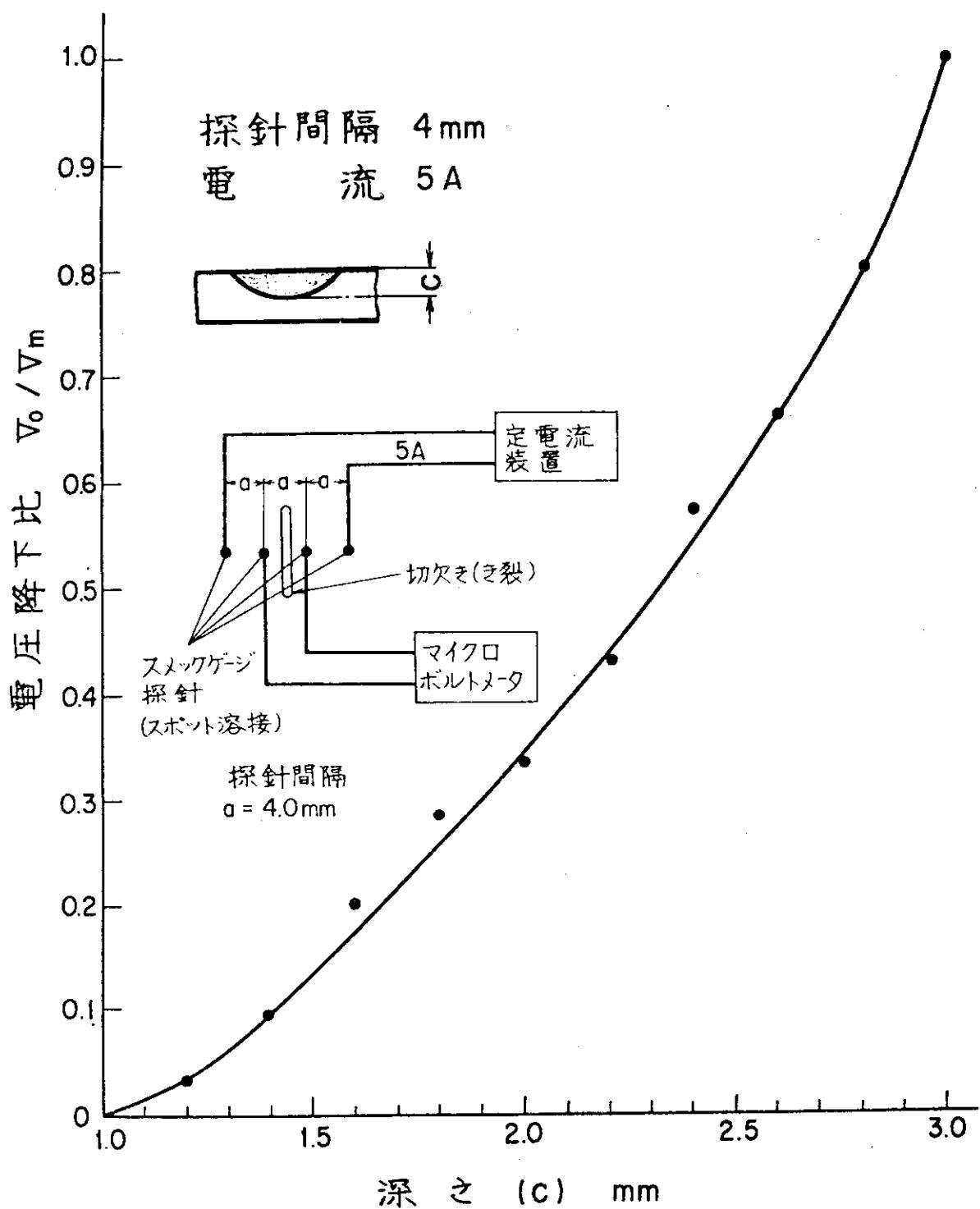


図 2.2.3 スメックゲージ較正曲線

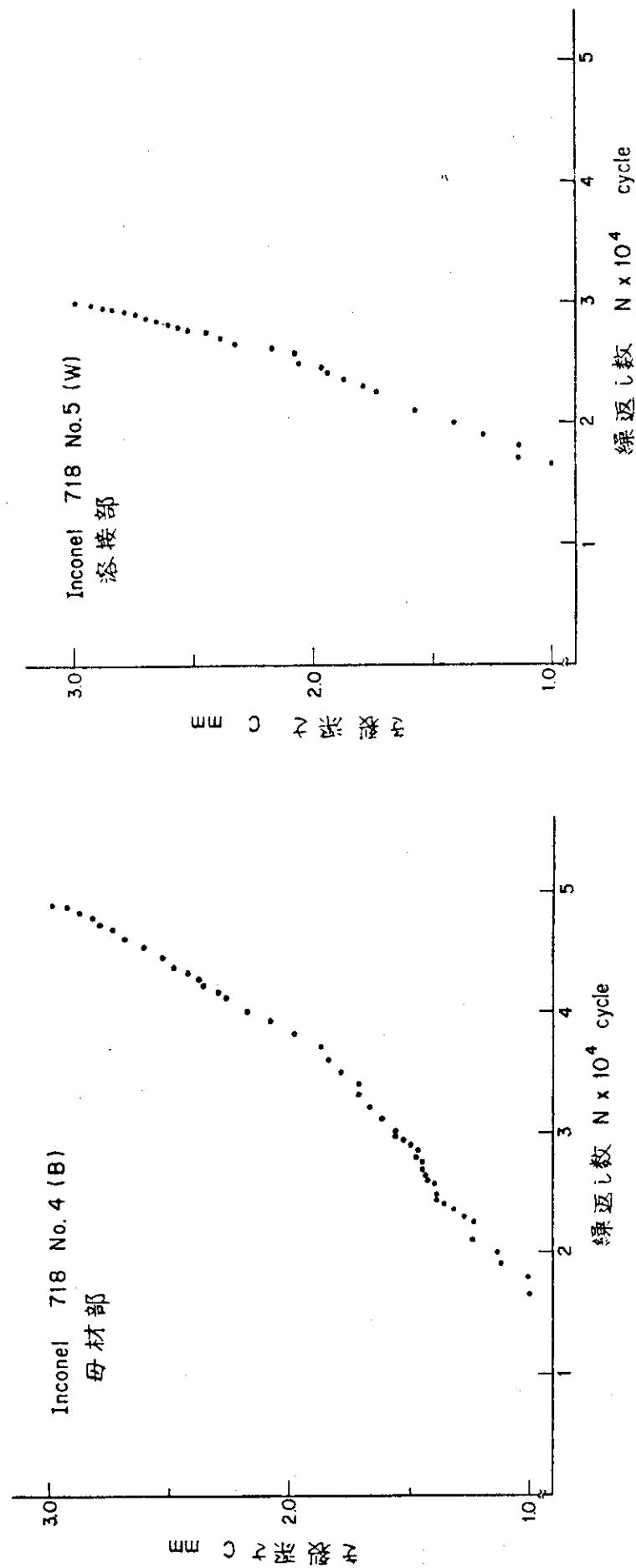


図 2.2.4 板厚方向のき裂伝播曲線

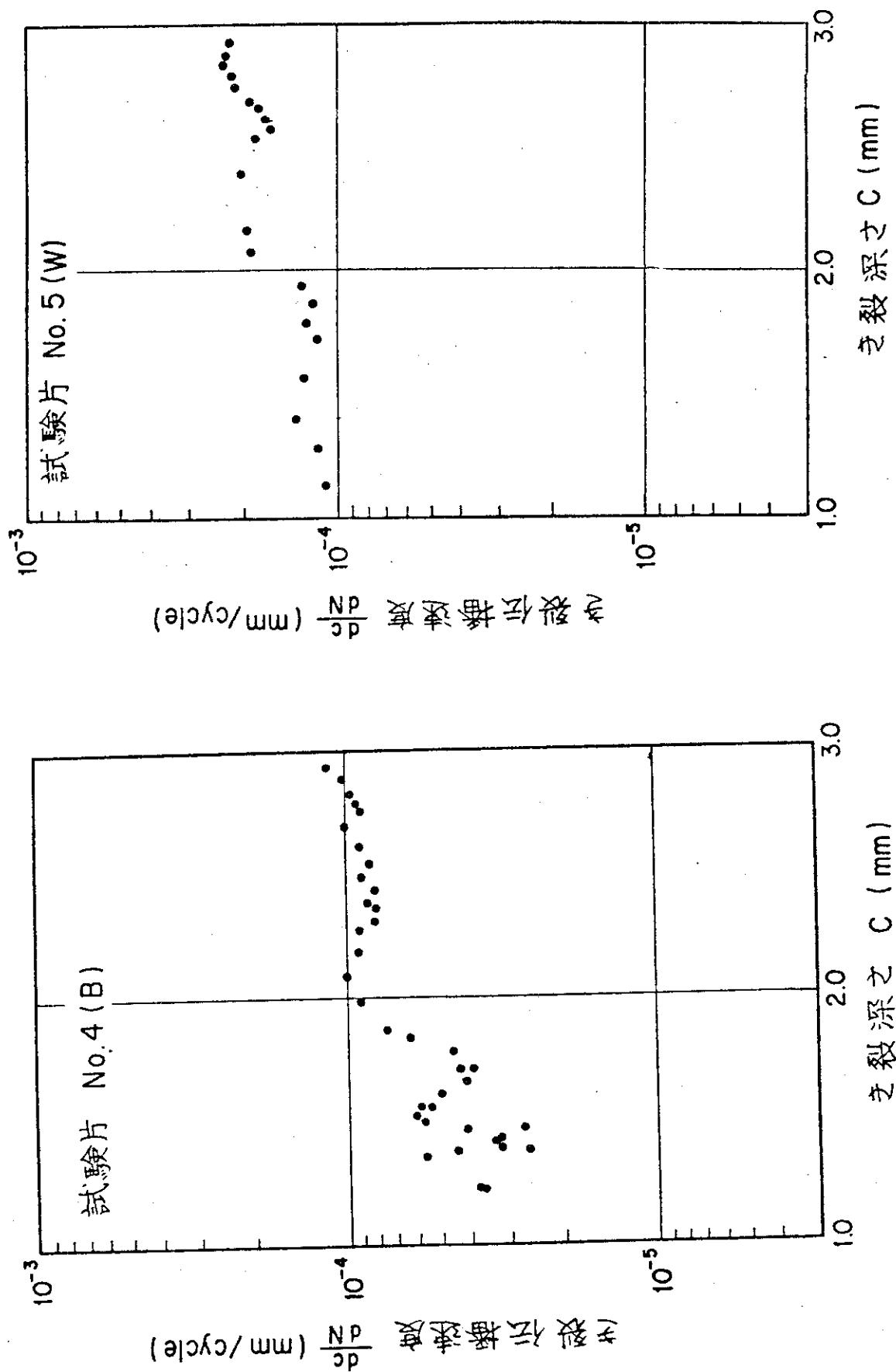


図 2.2.5 き裂深さとき裂伝播速度の関係

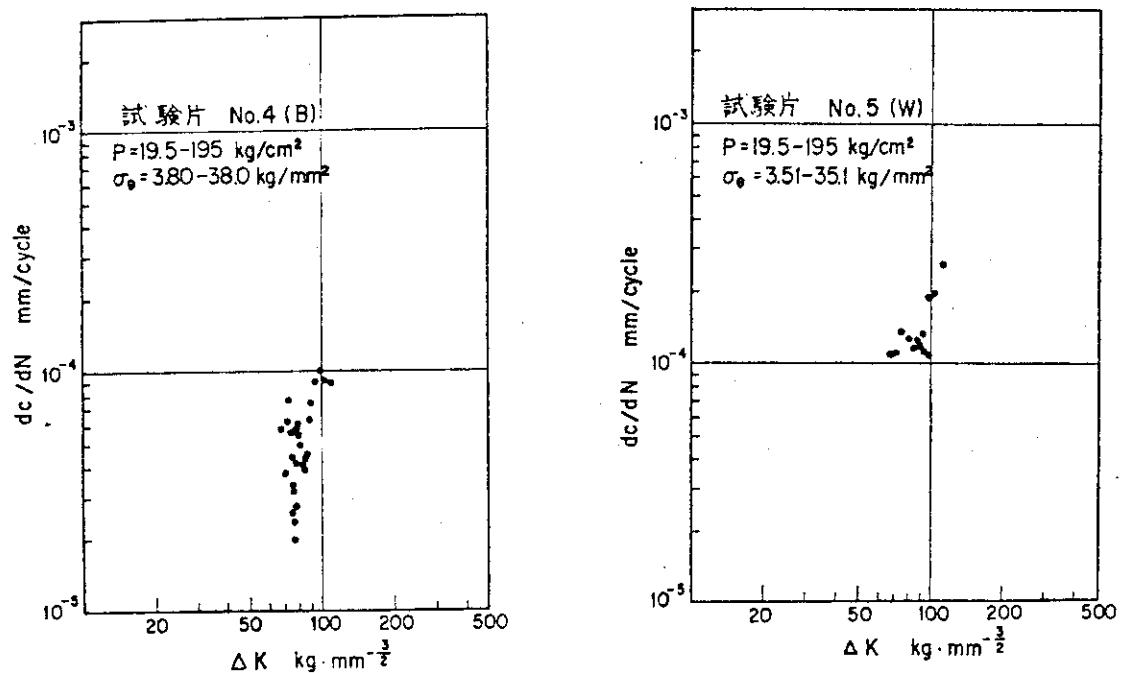


図 2.2.6 $\frac{dc}{dN}$ - ΔK 曲線

3. 内圧繰返し試験における AE 特性の計測

3.1 第5号圧力容器モデル

3.1.1 AE 計測系

昭和48年度における第1次共同研究の終了後、電力中央研究所は、種々のAE信号特性が総合的かつリアルタイムに調べられることを特徴とする「AE特性総合測定解析装置」を試作した。⁴⁾ 本装置の主な構成および仕様を表3.1.1に示す。また、その系統図を図3.1.1に示す。

本共同研究におけるような長期間にわたる構造物疲れ試験に対して、上記のAE装置の利用方式としては次のような2種の方式がある。

- (1) 疲れ試験現地に全測定系を搬入し、自動運転でリアルタイムにAE特性の測定と解析を行なう方式、
- (2) 疲れ試験現地には簡易なAE計測系を搬入しAE情報を磁気テープに記録するにとどめ、AE特性総合測定解析装置は別個所の解析センタに配置して、そこで詳細な記録データの解析を行なう方式。

本共同研究においては、(1)の方式を圧力容器モデル試験に、また(2)の方式をインコネル718管試験に適用した。

圧力容器上のAE変換子の取付け状況と配置図をそれぞれ図3.1.2および3.1.3に示す。同図に示されているAE変換子は、300 kHz共振の高感度型AE変換子であるが、他にDUNEGAN/ENDEVCO社製D9201広帯域型AE変換子も波形および周波数解析用に使用した。図3.1.4に両種のAE変換子の感度特性を示す。

AE検出系の設定条件としては、

プリアンプ増幅度 : 40 dB

メインアンプ増幅度 : 50 dB

周波数フィルタ帯域 : 300 kHz - 600 kHz

を基本とした。また、AE位置標定用に必要な音速条件としては、擬似信号による伝播特性の実測から2980 m/sとした。

3.1.2 AE 特性

圧力容器モデルの内圧繰返し試験は、昭和50年12月11日にまず0 → 30 → 60 → 90 → 110 → 0 kg/cm² の内圧負荷による静圧試験で開始した。

静圧試験におけるAE特性の計測結果を図3.1.5～7に示す。同図において次のようなAE特性が見られる。

- (1) AE発生状況は、30 kg/cm²以上の昇圧過程でAE活動度が高い。
- (2) その際のAE振幅分布は、典型的な塑性変形型のスペクトルを示しており、高勾配の対数直線分布になっている。

(3) AE発生源の分布は、ほぼ一様に圧力容器の全面に広がっている。

以上のような静圧試験の終了後、直ちに $0 \approx 110 \text{ kg/cm}^2$ 、4~4.5サイクル/分の条件で内圧繰返し試験に入った。その後12月12日に820サイクルで一時試験を中断した後、12月15日に再開し、12月23日に29,200サイクルの時点でのノズルNo. 1 (T-Nノズル) のボトム側切欠部から油の漏洩が確認され試験を終了した。なお、本試験では、2,000サイクル時点のスマックゲージの断線など、により何度か試験が中断している。

以上のような内圧繰返し試験過程において、200サイクル付近から振幅が変換子出力換算で10 mV以上、持続時間が15 ms以上の極めて大きな信号が発生してAE計測を妨害した。この信号は6,000サイクル付近まで継続した後、しばらく消滅したが、15,000サイクル付近より再び発生し、21,000サイクル付近まで続いた。

AE累積計数の試験全過程の測定結果を図3.1.8に、また5,110サイクル以降の拡大図を図3.1.9に示す。なお、図3.1.8中に示してあるように、上述の大振幅信号の発生のためAE計測条件を大幅に変更している。

この大振幅信号の発生過程における代表的なAE振幅分布の計測例を図3.1.10に示す。同図において、大振幅信号は100CH付近に計数ピークを形成するようなスペクトル形状を示しており、通常のAE信号が両対数表示で負勾配の直線分布スペクトルになることと対照的である。

このピーク部分を除いた低振幅域の振幅分布はほぼ直線状のスペクトルとなっている。図3.1.11は、このような低振幅域についてのAE振幅分布の代表例を示したものである。同図において、500サイクル時点では高勾配の振幅分布が、1,000および2,000サイクル時点では 45° に近い低勾配の振幅分布になっており、疲れき裂の発生に対応しているものと考えられる。すなわち、これまでの疲れ過程のAE振幅分布の測定例によれば、疲れき裂発生前には高勾配であったものが、疲れき裂の発生と共に 45° に近い低勾配のAE振幅分布となることが多くの事例で認められている。

図3.1.12は、対数直線勾配m(すなわち、 $N = N_0 V^{-m}$, ここでVはAEピーク振幅、NはAE計数)の2,000サイクル付近までの測定例を示す。同図において、試験開始後、対数直線勾配は徐々に高くなる傾向にあるが、900サイクル付近から $m = 1$ 、すなわち 45° の勾配になっている。したがって、疲れき裂の発生は約900サイクルであると推定される。

小型材料試験片に対するAE計測の場合に比較して、構造物試験に対するAE計測の場合の大きな相異点は、環境雑音とAE発生箇所の多様性にある。とくに、後者に対してはAE位置標定が不可欠の役割を果す。AE位置標定の計測例は、すでに図3.1.7に1例を示しているが、このようなAE標定結果からある領域におけるAE標定数を求めることができる。図3.1.13は、最終的に疲れき裂が貫通したNo. 1ノズル(T-Nノズル)のボトム側切欠部について、1サイクルあたりのAE標定数の疲れサイクルに伴なう変化を示したものである。同図において、AE標定数の変化は、図3.1.8または9に示したAE累積曲線とは異なり、20,000サイクル付近から増加していると共に、貫通リーケ前にはかえって減少していることがわかる。なお、多くの構造物疲れ試験において、最終的な疲れき裂貫通時にAE標定数が減少する例はしばしば観測されている。

3.1.3 検討

構造物疲れ試験の特徴として、環境ノイズの問題とAE発生源の多様性の問題があることは既述したとおりである。このような問題は、すでに第1次共同研究の時点で指摘されていたが、本試験においても、より苛酷な状況となって出現した。

図3.1.14および15は、代表的なAE信号およびノイズの波形と周波数スペクトルの測定例である。既述したように、図3.1.15の上段に示した大振幅信号が、本試験においては著しいAE計測上の防害となった。この大振幅信号は、振幅が著しく大きな点と立上がり時定数が緩やかである点を除けば、AE信号と類似しており、AE検出器から比較的遠距離にある発生源に起因しているものと考えられる。

この大振幅信号については、その発生位置の推定のためにより詳細なAE標定法を適用したが、80%程度の大振幅信号に対して圧力容器表面上には標定点を求めることが不可能であった。このことは、大振幅信号の発生位置が圧力容器の内部にあるものと推定されるが、そのような根拠としては、本試験の供試容器が大型のために油量低減化上圧力容器内部にアルミ製の中子を入れたことに起因するものとも考えられる。

表 3.1.1 AE 特性総合測定解析装置各部仕様

1. 信号検出・処理系

<u>プリアンプ</u>	10 チャンネル (NF回路製)
利得	20 / 40 dB, 最大 $2V_{p-p} / 50\Omega$
入力換算雑音	$6\mu V_{rms}$ (入力 50Ω 終端時)
周波数特性	10 kHz ~ 2 MHz (± 3 dB以内)
減衰特性	HPP (40 dB/OCT, 5 kHz 以下 -60 dB)
入/出力インピーダンス	$20 k\Omega$, $30 pF / 50\Omega$ 不平衡
入力形式	SINGLE/DIFFERENCE 切換
<u>バッシングフィルタ</u>	10 チャンネル (NF回路製)
利得	1
入/出力インピーダンス	50Ω
遮断周波数	HPP: FLAT, 100 k, 300 k, 1 MHz LPF: FLAT, 200 k, 600 k, 2 MHz
減衰特性	40 dB/OCT (帯域外HPP: -60 dB, LPF: -50 dB)
<u>メインアンプ</u>	10 チャンネル (NF回路製)
利得	0 ~ 60 dB (連続可変), 最大 $10V_{p-p} / 200\Omega$
入/出入力インピーダンス	50Ω (不平衡) / 10Ω 以下
入力換算雑音	$25\mu V_{rms}$ 以下 (入力 50Ω 終端時)
周波数特性	500 Hz ~ 2 MHz (± 3 dB)
対数増幅特性	$80 mV / dB$ (0.01 ~ 1 V), $0V / 0V$, $1V / 1V$
<u>ディスクリミネータ</u>	4 チャンネル (NE回路製)
入力	4 チャンネル各 2 レベル (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2) $50 mV$, $500 mV$, $5V$ 各段 $\times 0.1 \sim \times 1$
不感時間	OFF, 0.1, 1, 10 ms 各段 $\times 0.1 \sim \times 1$
パルス出力	TTL レベル負論理 ($500 ns$)
アナログ出力	最大 $10V$ (入力 50kHz 時)
<u>エンベロープデテクタ</u>	4 チャンネル (NF回路製)
入力	4 チャンネル (A, B, C, D)
包絡線出力	時定数 立上り $3\mu s$, 立下り $100\mu s$, 全波 / 半波 整流切換
ピークパルス出力	ピークホールド方式, パルス幅 $5\mu s$, ピーク電圧 $0.5 \sim 1.5$ 倍可変
アナログ出力	実効値, 最大 $10V$ (DC)
<u>累積カウンタ</u>	4×2 チャンネル (NF回路製)
入力	ディスクリミネータ出力 8 チャンネル
桁数	10 桁
アナログ出力	任意の連続した 3 桁, 最大出力 $9.99V$
デジタル出力	日時分, サイクル数と共にプリンタに印字
リセット / プリント指令	手動およびタイマー (1 ~ 99 分), サイクルカウンタ (1 ~ 999 サイクル) 選択

表 3.1.1 (続) A-E 特性総合測定解析装置各部仕様

2. 解析・表示系

<u>波形解析器</u>	1式 (BIOMATIION社製)
形 式	BIOMATIION Model 8100 トランジエントレコーダ
入 力	1/2 チャンネル, $\pm 50 \text{ mV} \sim \pm 5 \text{ V}$, 50Ω
分 解 能	振幅 8ビット
サンプリングレート	10 ns ~ 10 s / ch, 各桁 $\times 1, \times 2, \times 5$
メ モ リ	2048ワード
記録モード	遅延, トリガホールドオフ, ブリトリガ
<u>周波数解析器</u>	1式 (タケダ理研製)
形 式	タケダ理研 TR-4120 トラッキングスコープ
入 力	-130 dBV ~ 100 dBV
周 波 数 範 囲	100 Hz ~ 30 MHz
トラッキング ジェネレータ	内蔵
出 力	CRT表示, アナログ出力
<u>発生率・ 振幅分布解析器</u>	1式 (CANBERRA社製)
形 式	CANBERRA社製 8100/8220 マルチチャンネル波高分析器
ミキサー入力	1, 2, 4チャネル
メモリサイズ	1 kW ($1/4 \sim 4/4, 1/2 \sim 2/2, 1/1$)
データ収集方式	波高分析 (PHA) モード, マルチチャンネルスケーラ (MCS) モード
PHA モード	$10^2 \sim 10^6$ counts, LOG表示, $1 \sim 9 \times 10^5$ s (波高/カウント)
MCS モード	$10 \mu\text{s} \sim 9 \text{ s} / \text{ch}$, (時間/計数率)
<u>LCAロケータ</u>	1式 (NF回路製)
入 力	3チャネル, 包絡線検波信号
ディスクリレベル	手動 (50mV, 500mV, 5V 各段 $\times 0.1 \sim \times 1$), 自動 ($10^3, 10^2, 10 \text{ c p s}$)
位 置 分 解 能	1次元 (8ゾーン), 2次元 (64ゾーン)
デーティメモリ	16ビット
<u>演算・処理器</u>	1式 (DEC社製)
形 式	DEC-PDP 11/05
サイクルタイム	$1.2 \mu\text{s}$
コアメモリサイズ	16K語 (1語 = 16ビット)
I/O 関係	波高分析器, トランジエントレコーダ, 時間差計, LCA, セレクタ
<u>表示・指令器</u>	1式 (テレタイプ社, ソニーテクトロニクス社)
テ レ タ イ プ	テレタイプ ASR 33 (10キャラクタ/sec)
グラフィック ディスプレイ	ソニーテクトロニクス 4012型 (1023×780 点, 74×35 文字)
ハ ハード コ ピ ー	ソニーテクトロニクス 4610型 ($18 \text{ s} / \text{枚}$)

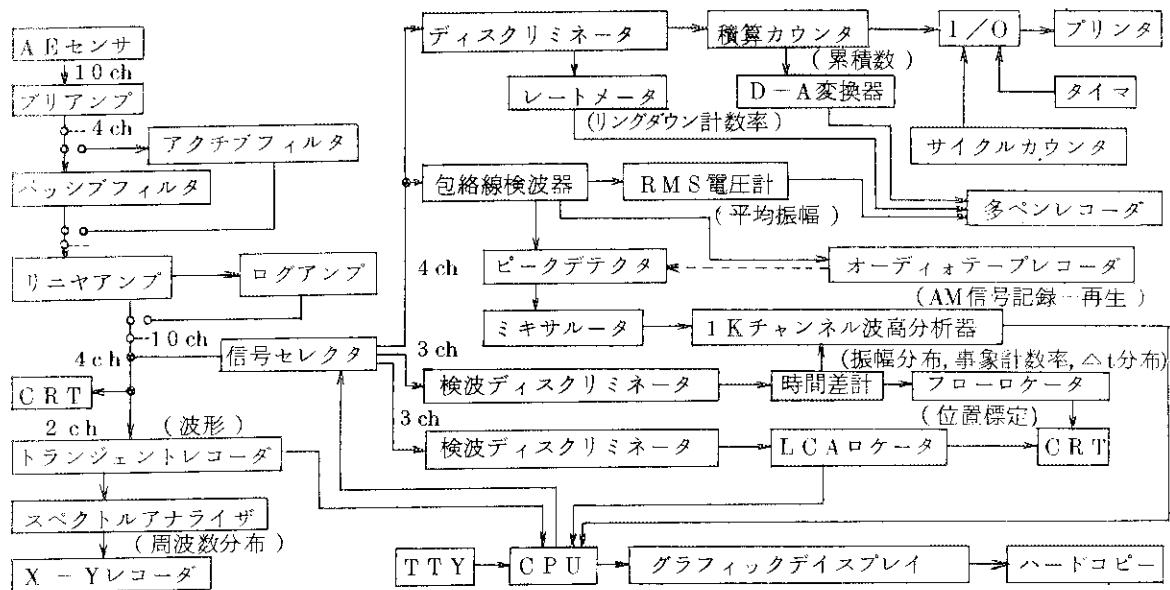


図 3.1.1 AE 特性総合測定解析装置の系統図

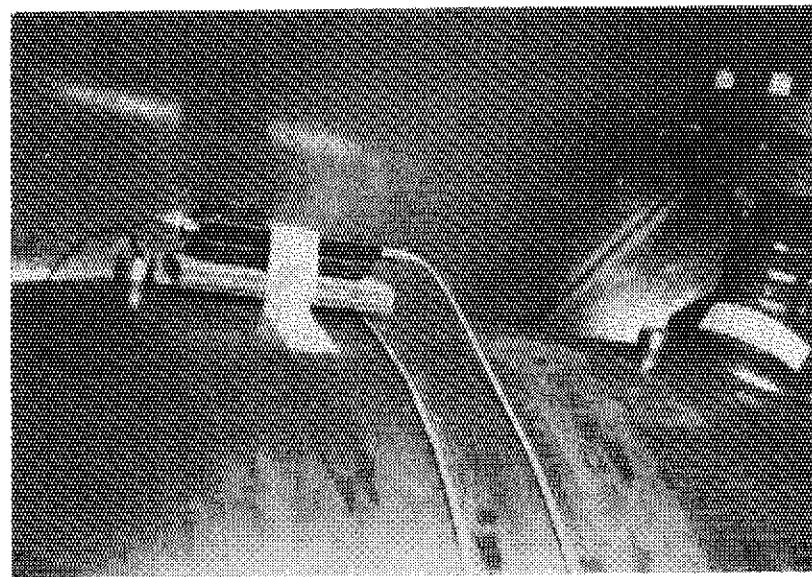


図 3.1.2 圧力容器モデル上の AE 変換子およびプリアンプ

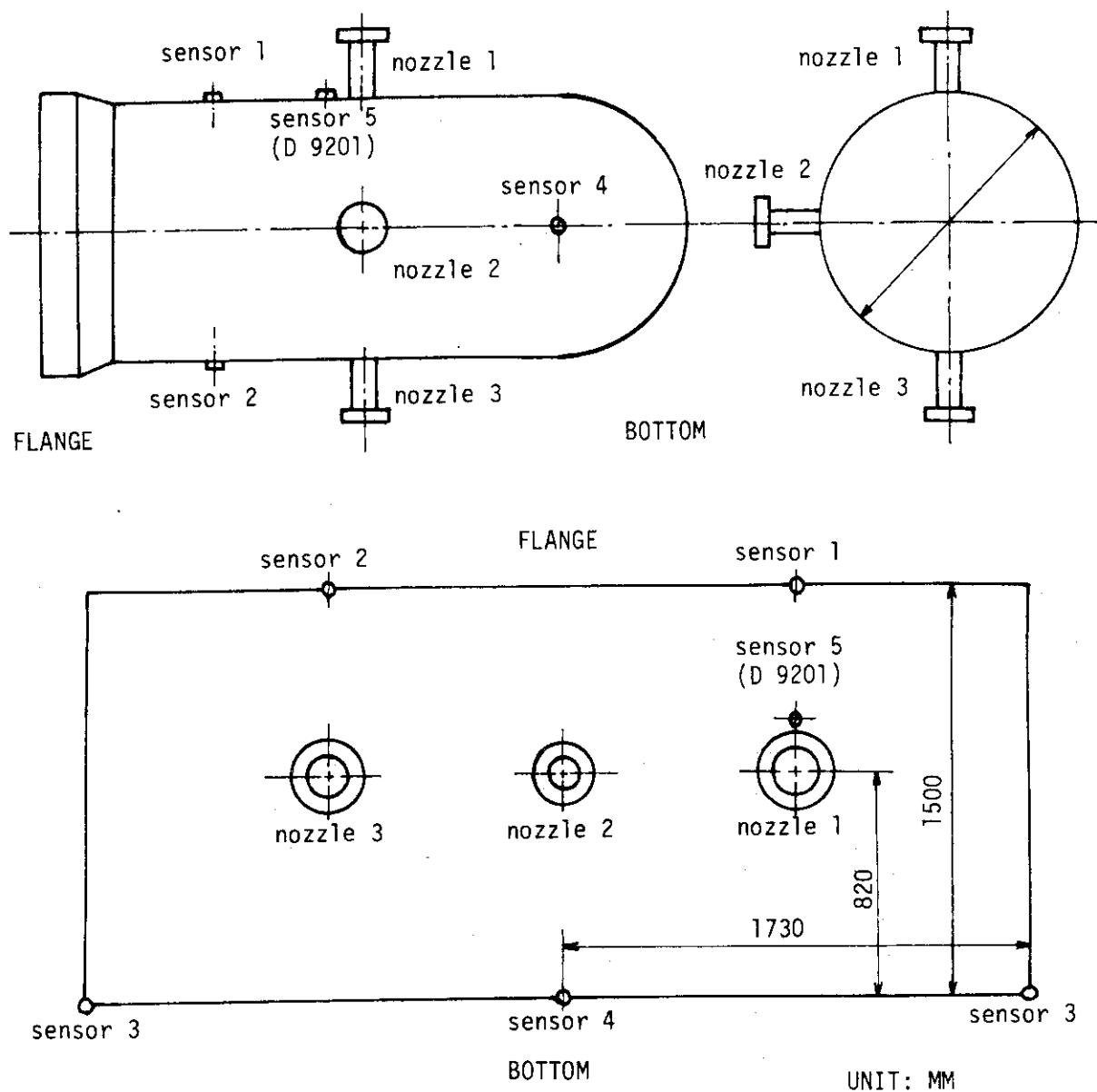
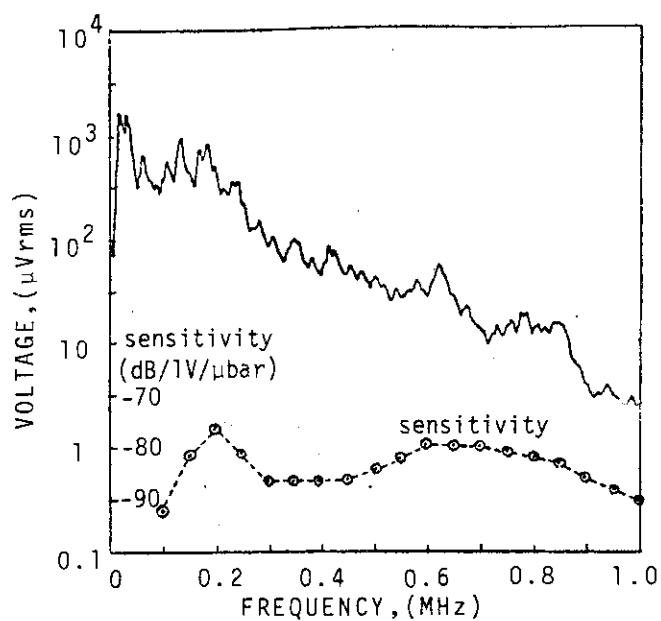
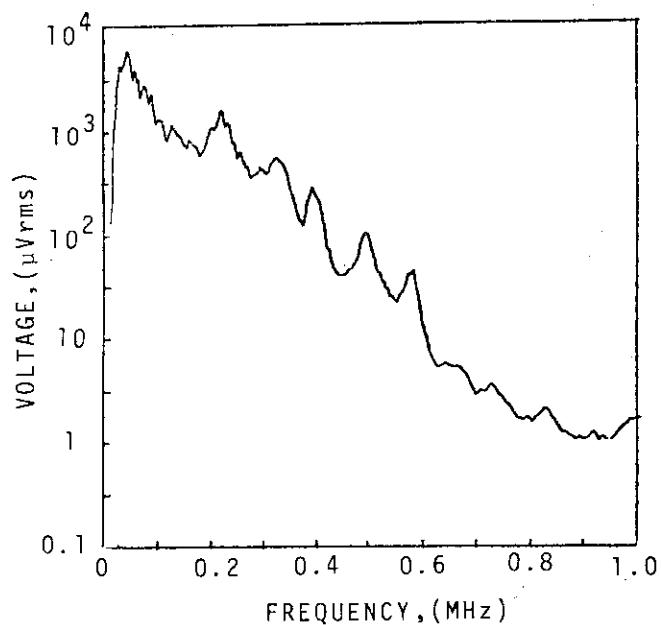


図 3.1.3 軽水炉圧力容器モデル上の AE 変換子の配置
〔ノズル No. 1 : T-N, No. 2 : H-N, No. 3 : N-N〕



(a) DUNEGAN/ENDEVCO社製 D 9 201型



(b) 300 kHz共振型

図 3.1.4 水道蛇口音による使用 AE 変換子の感度特性の比較

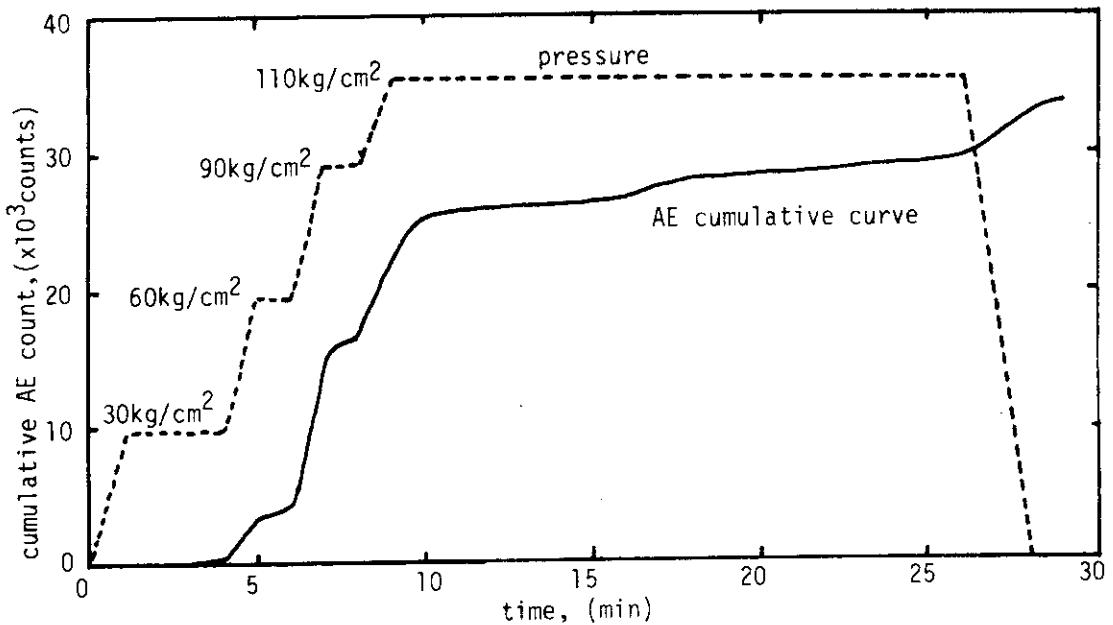


図 3.1.5 静圧試験時の A E 累積計数曲線 (A E 変換子 No. 4)
〔増幅度 : 40+50 dB, しきい値 : 0.25 V〕

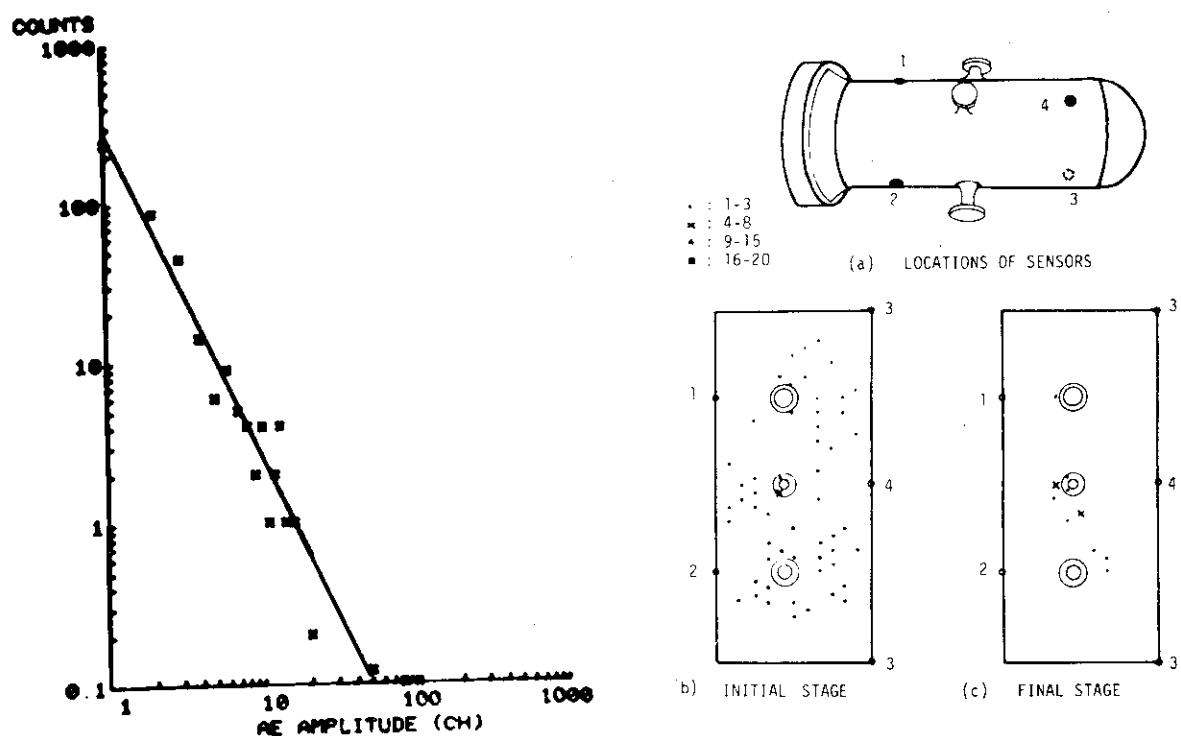


図 3.1.6 静圧試験時の A E 振幅分布
〔A E 変換子 No. 4, 横軸 : 25 CH = 1 V / 90 dB〕

図 3.1.7 A E 位置標定例
〔(b) 静圧試験, (c) 疲れ試験末期〕

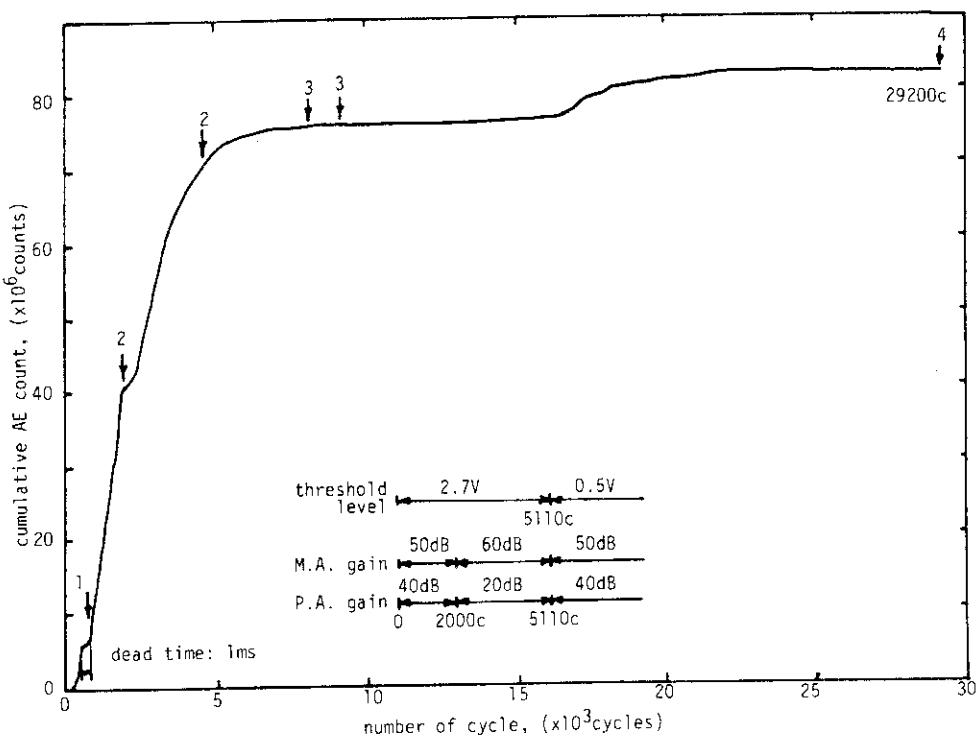


図 3.1.8 内圧繰返し試験過程における AE 累積計数曲線 (AE 変換子 No. 4)
〔図中の数字 1 : 試験中断, 2 : スメックゲージリード線切断,
3 : ホース交換, 4 : 試験終了〕

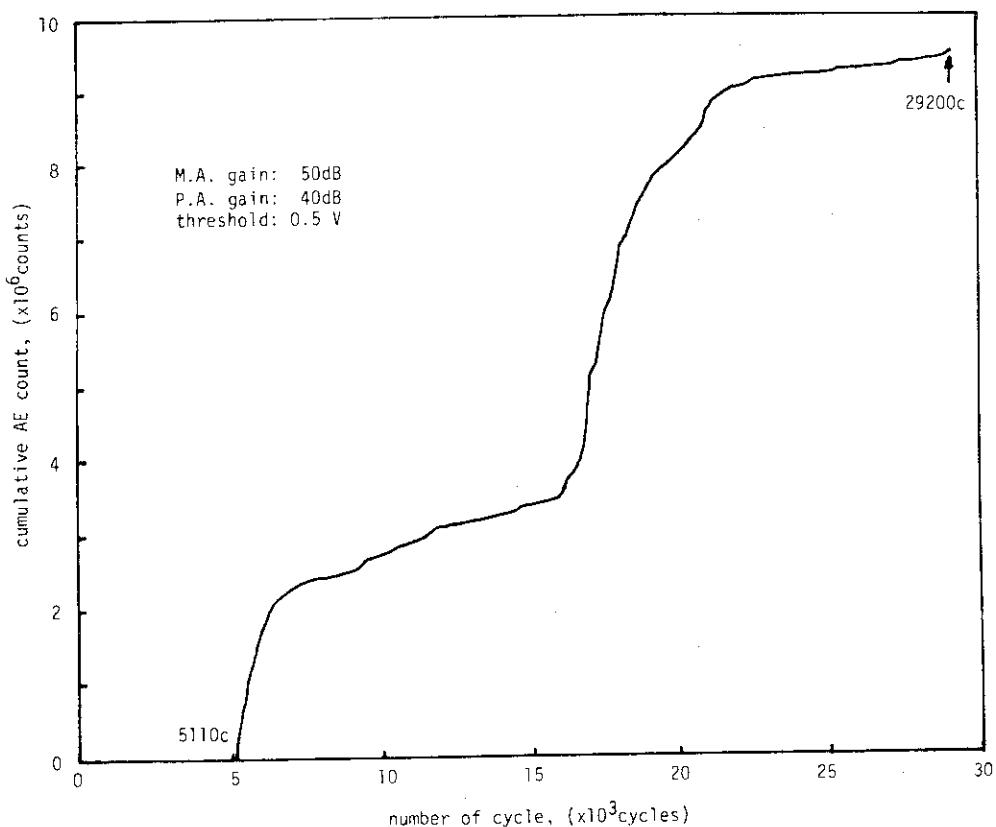


図 3.1.9 5110 サイクル以降の AE 累積計数曲線 (AE 変換子 No. 4)

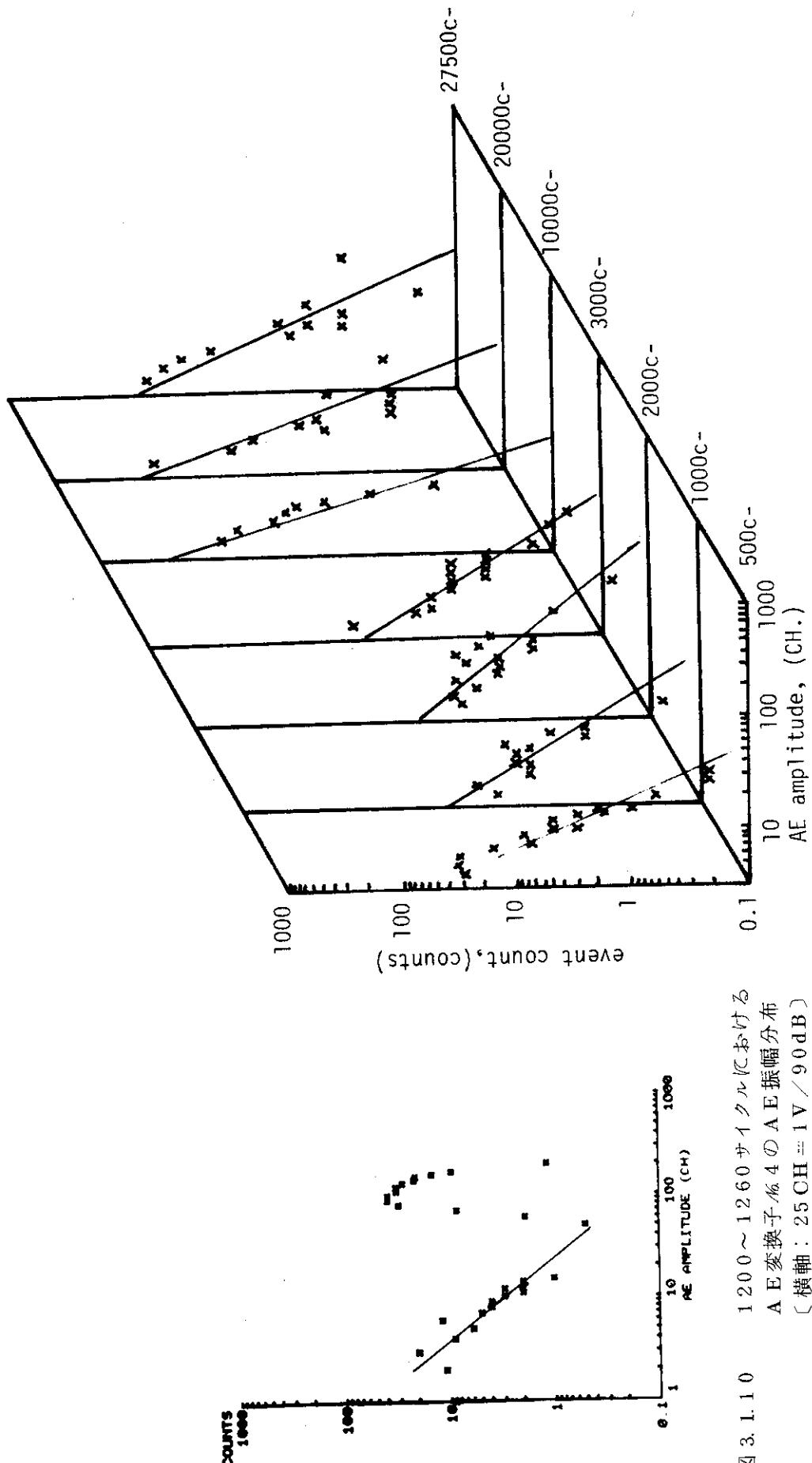


図 3.1.11 1200～1260 サイクル/秒における
A E 変換子 No. 4 の A E 振幅分布
〔横軸：25 CH = 1 V / 90 dB〕



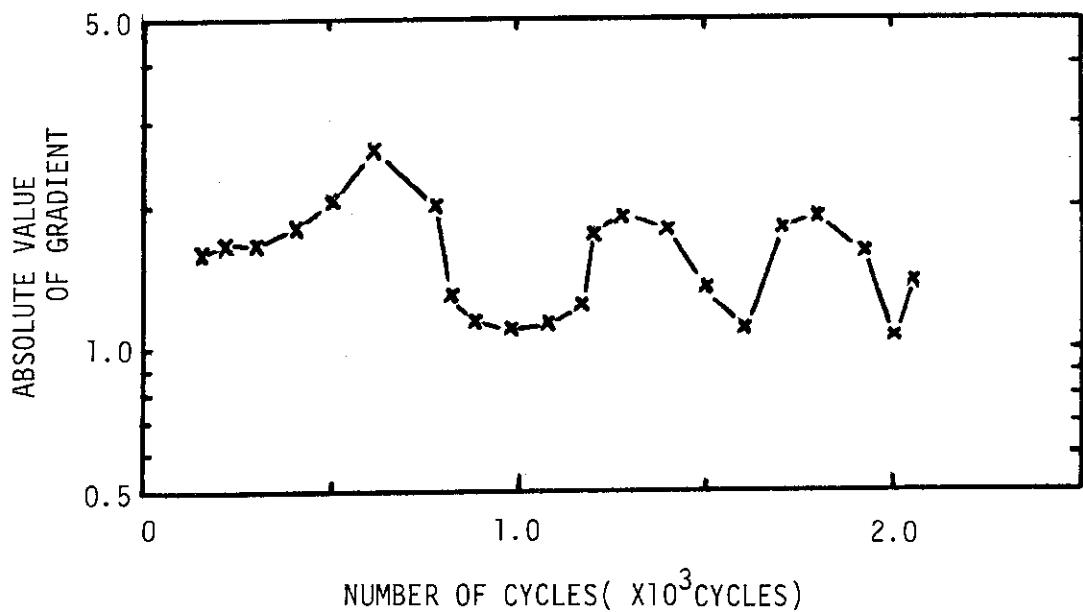


図 3.1.12 内圧繰返し試験初期における A E 振幅分布の対数直線分布勾配の変化

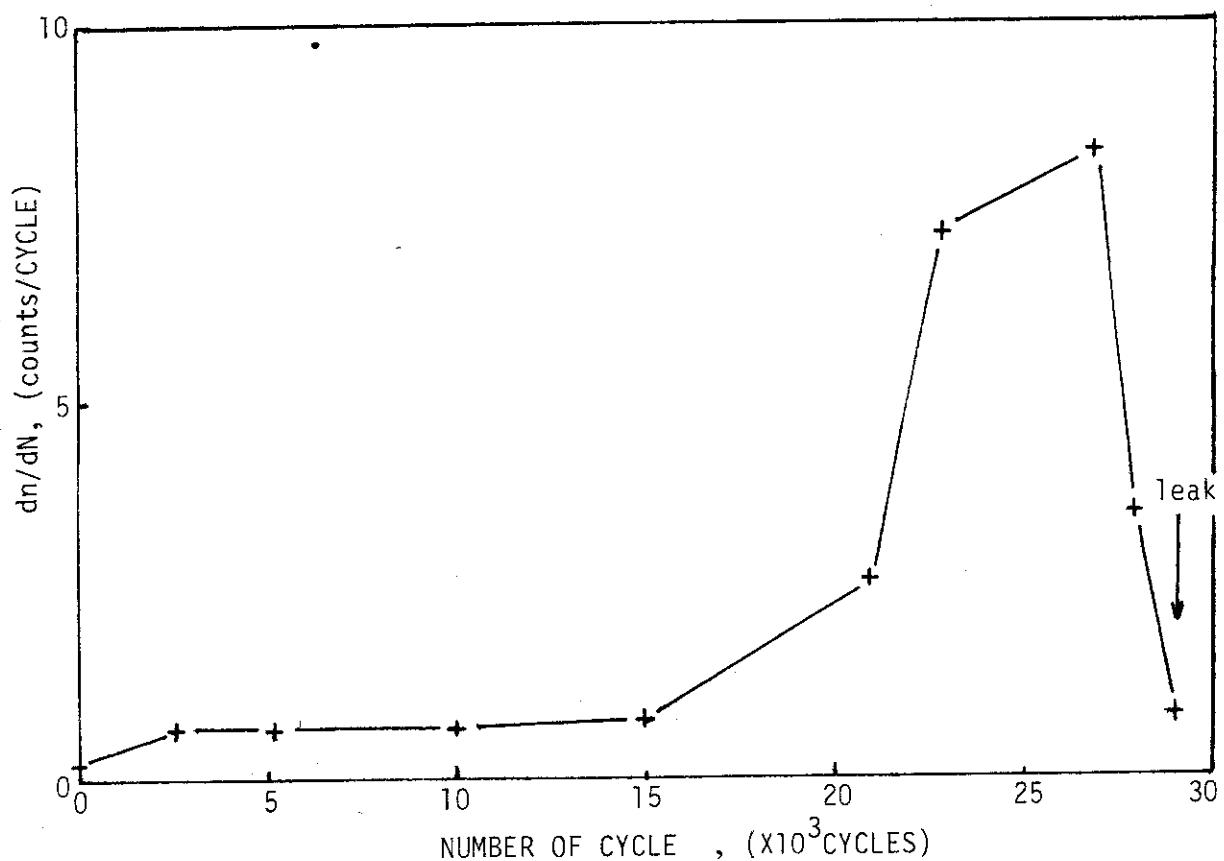
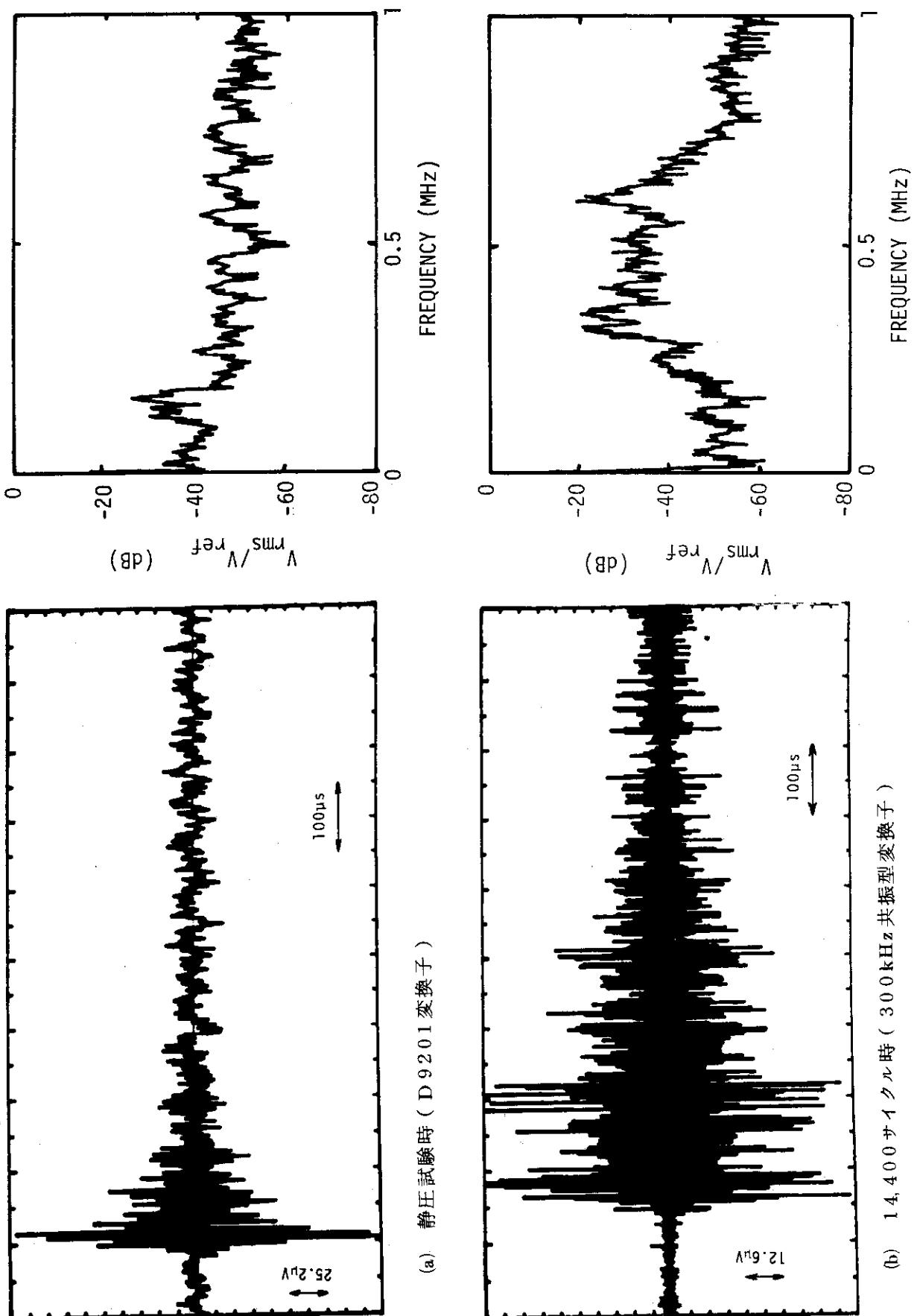


図 3.1.13 T - N ノズルのボトム側切欠部における 1 サイクルあたりの A E 標定数の変化



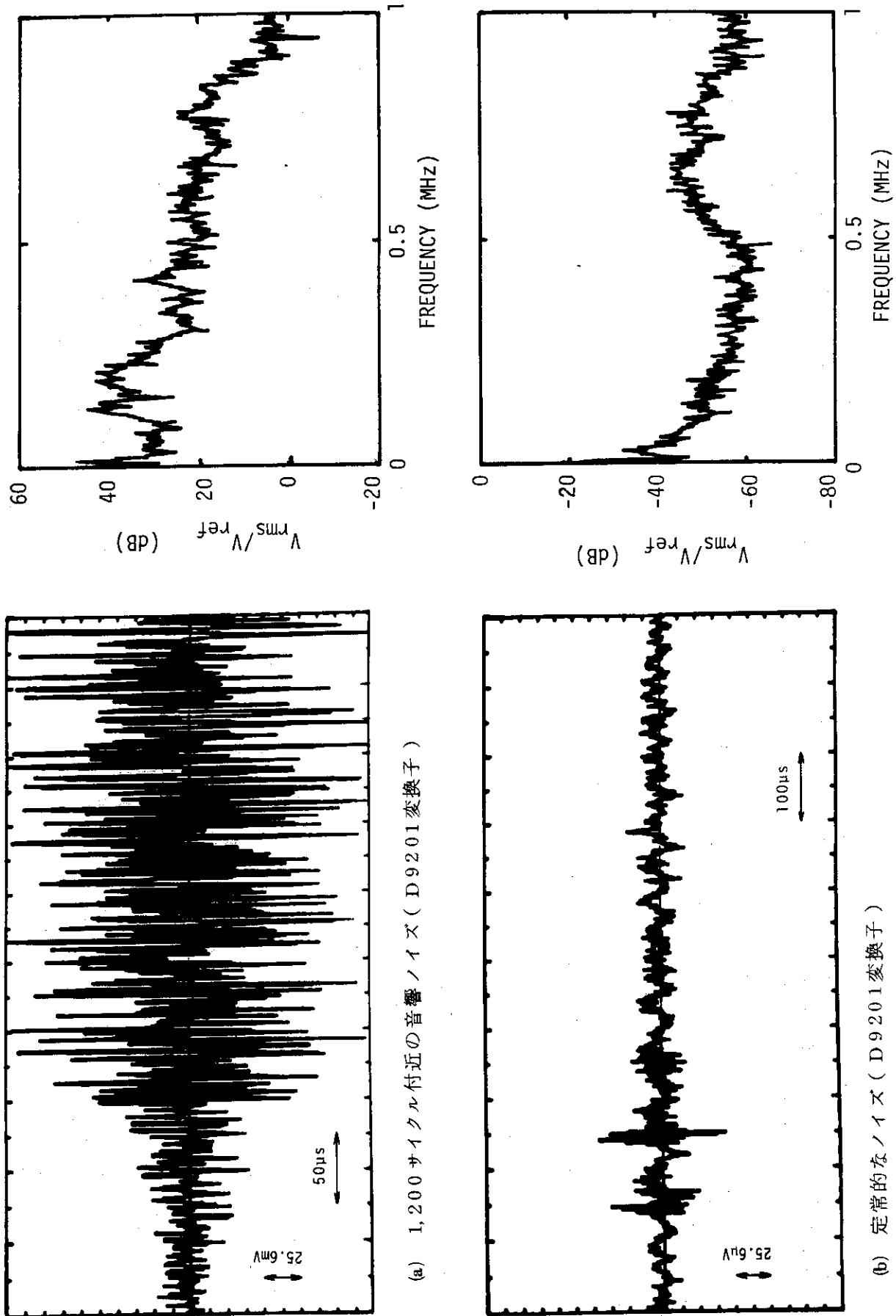


図 3.1.15 代表的なノイズ波形とその周波数スペクトル

3.2 NSRR用インコネル718管

3.2.1 AE計測系

切欠きを付けたNSRR用インコネル718管の内圧繰返し試験に対するAE計測は、日本原子力研究所が実施した一連の配管モデル試験の中からインコネル718管のN-4試験（母材部切欠き）およびN-5試験（溶接金属部切欠き）の2試験について実施した。

これらの試験における配管モデル上のAE変換子の配置図を図3.2.1に示す。また使用したAE計測系の系統図を図3.2.2に示す。既述したように、本配管モデル試験については、AE計測系は簡易化しており、磁気テープへの包絡線検波信号の間欠的な記録を主体としている。なお、この磁気テープ記録信号の解析は図3.1.1で示したAE特性総合測定解析装置の一部を利用している。

本試験で使用したAE変換子は、図3.2.3に示すような感度特性をもつ170kHz共振の高感度型変換子であり、AE変換子の供試体への取付けは瞬間接着剤を用いて貼付ける方式を採用した。

図3.2.2に示したAE計測系の系統図において、プリアンプは50kHz高域フィルタと包絡線検波回路を内蔵しているものである。また、この包絡線検波信号を事象計数法で計数するカウンタを設置して簡易な監視計測ができるようにしてある。

磁気テープ記録信号の解析は、供試体が1次元的な配管モデルであることから、1次元AE標定法を主として利用し、切欠き部からのAE事象の計数変化を調べた。

3.2.2 AE特性

インコネル718管のN-4およびN-5試験はいずれも30サイクル/分の繰返し速度で $7 \pm 70 \text{ kg/cm}^2$ の内圧繰返し負荷を与え、表面切欠き部からの疲れき裂が肉厚を貫通するまで継続した。貫通確認はN-4試験が48,600サイクルおよびN-5試験が30,000サイクルであった。

N-5試験における簡易計測系によるAE事象計数曲線を図3.2.4に示す。また、1次元位置標定法による磁気テープ録音信号の解析結果を図3.2.5に示す。同図のAE標定結果が示すように、試験初期には2と3ゾーン、試験中期以降には6と7ゾーンにAE標定数が集中している。切欠き部に対応する標定域は6と7ゾーンに相当しており、試験初期における図3.2.4のAE事象数の増加は切欠き部以外からの信号によるものであることがわかる。

切欠き部からのAE事象数のみを積算した結果の例を図3.2.6に、また、それから1サイクルあたりの平均標定数を求めた結果を図3.2.7に示す。図3.2.7では、内圧繰返しサイクルの進展に伴なって、1サイクルあたりの平均標定数が増加するが、リーク直前には圧力容器試験の場合と同様に標定数は減少していることがわかる。

以上は溶接金属部に切欠きを入れた供試体のN-5試験の結果であるが、併行して同時に実施された母材部に切欠きを入れた供試体のN-4試験も同様な結果が得られた。しかし、溶接部に欠陥が含まれていないような溶着金属部に比較して、母材部は通常AEの活動が高い場合が多い。N-4試験でもこのような傾向が見られ、N-5試験に比較してAE事象計数率が

数倍高かった。そのような測定例として図3.2.8にN-4およびN-5試験におけるAE振幅分布の測定例を示す。同図のAE振幅分布はN-4およびN-5試験とも一方のAE変換子で計測した測定例であるが、静的試験および切欠き部以外からの信号が主であった試験初期を除き、両対数表示で低勾配の直線分布になっていることが特徴的である。

3.2.3 検討

本インコネル718管試験のAE計測には、試験現場では間欠的に磁気テープ録音を行ない、後日別個所にあるAE特性解析センタで録音信号の性質を調べるという簡易方式を採用した。このような方式は、AE原信号を必要とするAE波形や周波数解析が行なえない欠点があるが、コストパフォーマンスが著しく向上することから、疲れ試験などのように長期間にわたるAE試験に対して有効な1方式となり得るものと考えられる。なお、本試験で用いた磁気テープ録音方式は包絡線検波信号を採取するものであったが、その他にビデオテープレコーダの改良によって、2MHz近い高周波域までのAE原信号の長時間記録も可能であり、今後このような現地録音方式の利用が広く採用されることになろう。

本試験のような比較的単純な型の配管モデルにおいても、構造物試験特有の環境雑音とAE発生源の多様化の問題が生じている。本試験の場合には、1次元AE源標定方式を利用するこことによって比較的良好な標定結果が得られたが、一般にはAE源位置標定技法にはまだ多くの問題点も残存しており、今後より高精度および高精度の標定方式の開発が必要となろう。

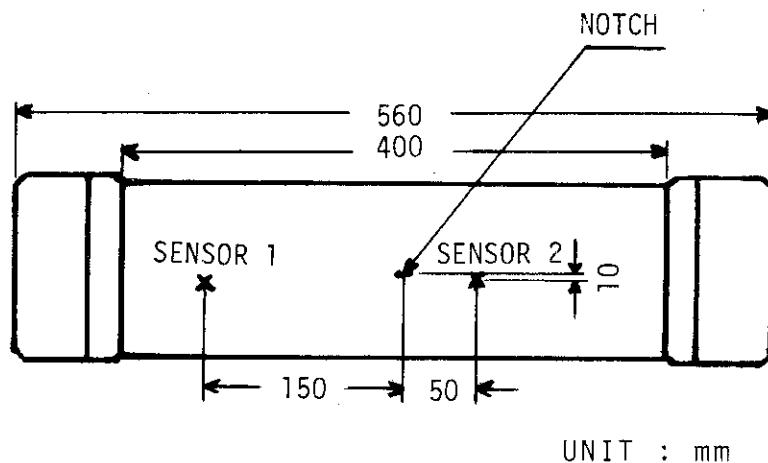
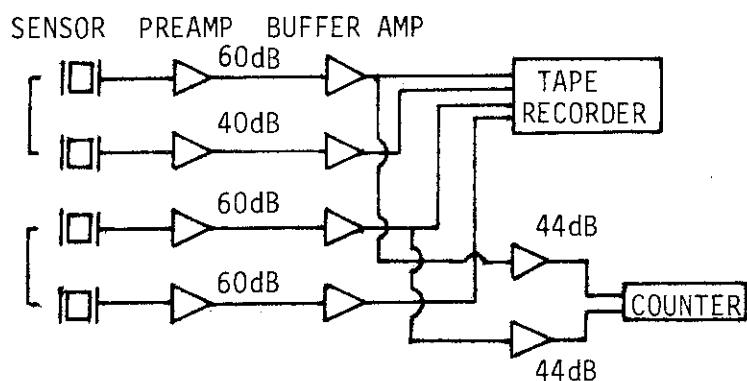


図 3.2.1 配管モデル上のAE変換子の配置

図 3.2.2 AE 計測系のブロック図
〔上：N4 試験，下：N5 試験〕

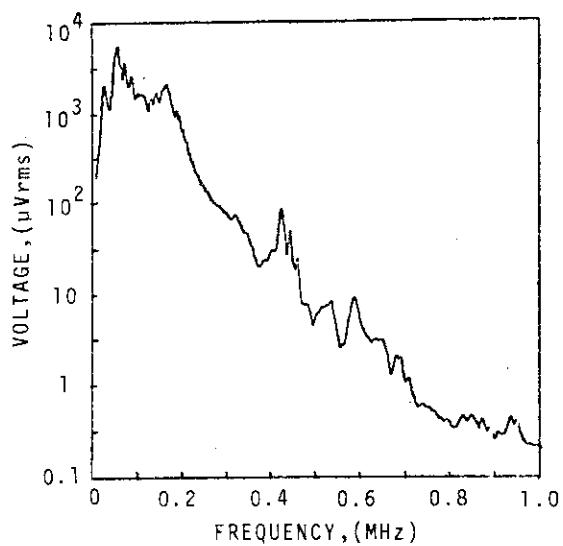
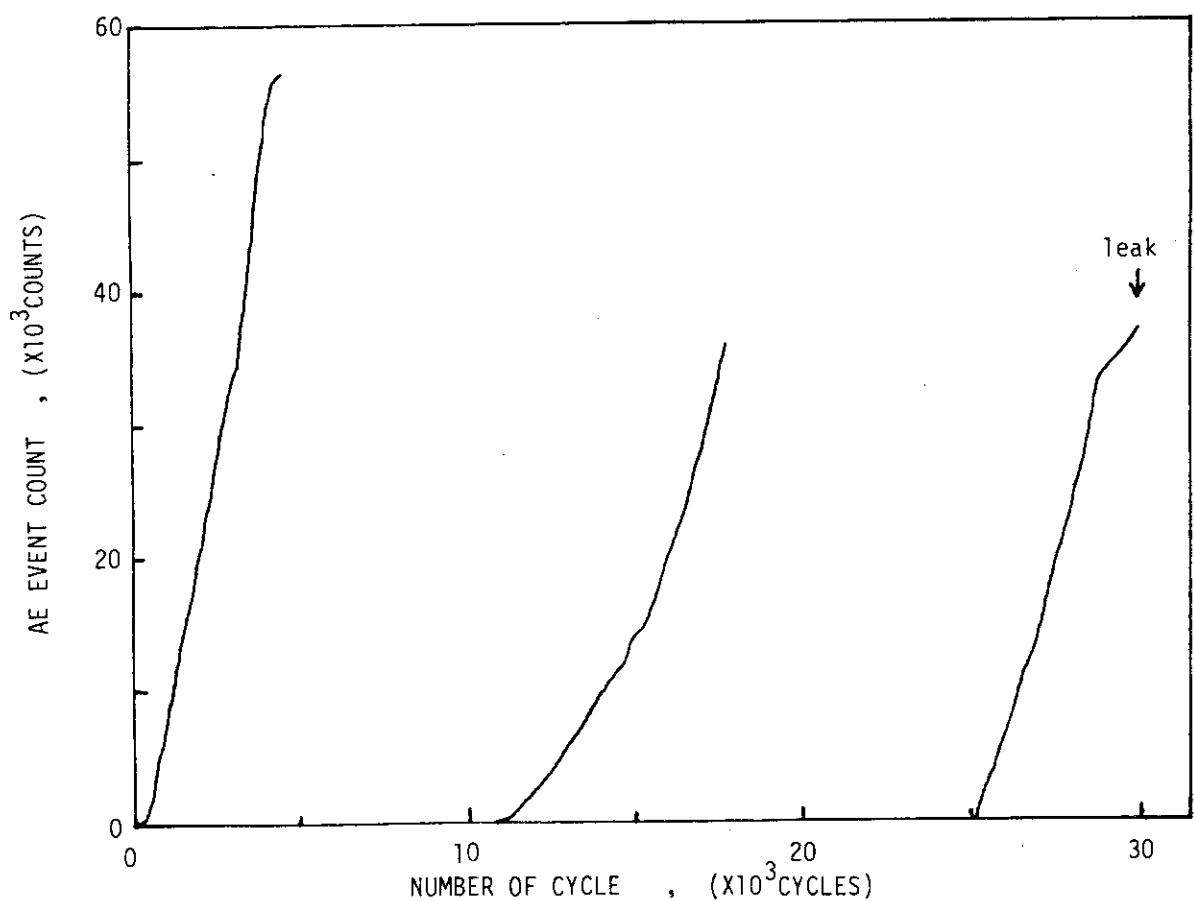
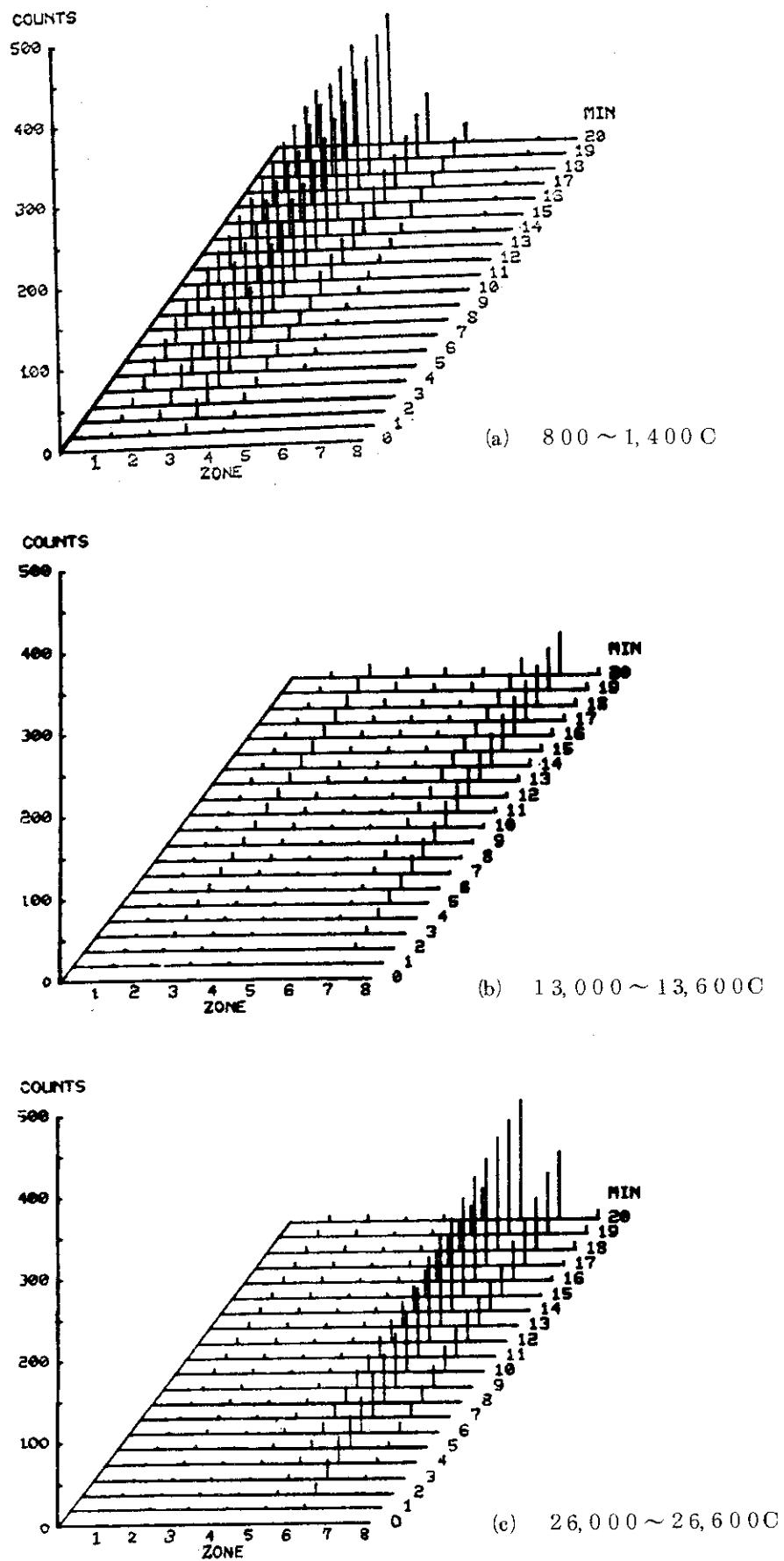
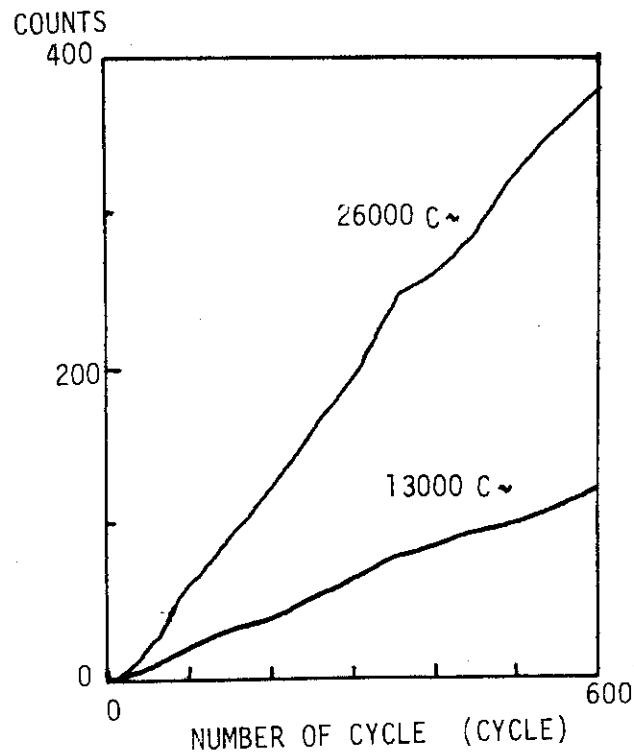
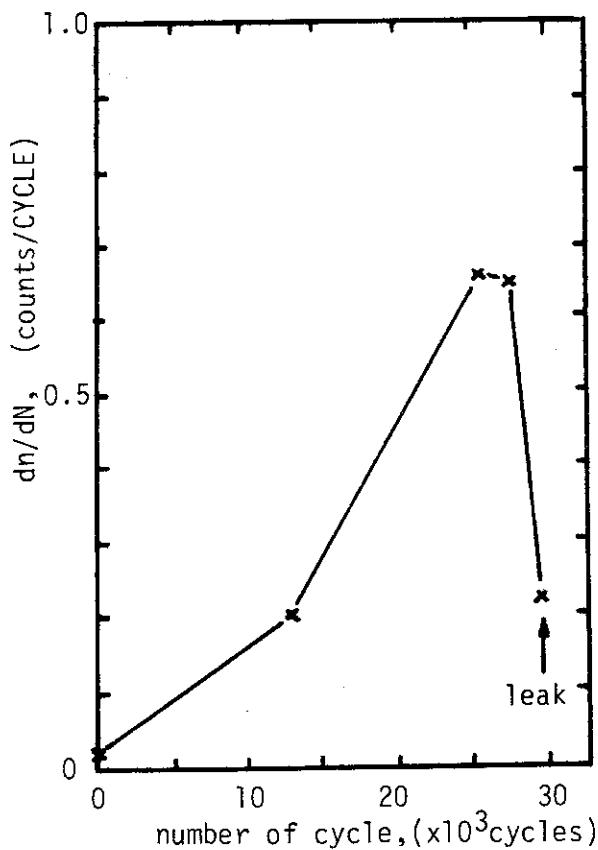


図 3.2.3 水道蛇口雑音による使用変換子の感度特性

図 3.2.4 No.5 試験内圧線返し過程における A E 事象計数曲線（間欠的計測）
〔総合利得 104 dB〕

図 3.2.5 Na_2O 試験における 1 次元位置標定例

図 3.2.6 $\alpha\delta 5$ 試験における切欠き部の AE 標定数の累積曲線図 3.2.7 $\alpha\delta 5$ 試験における 1 サイクルあたりの AE 標定数の変化

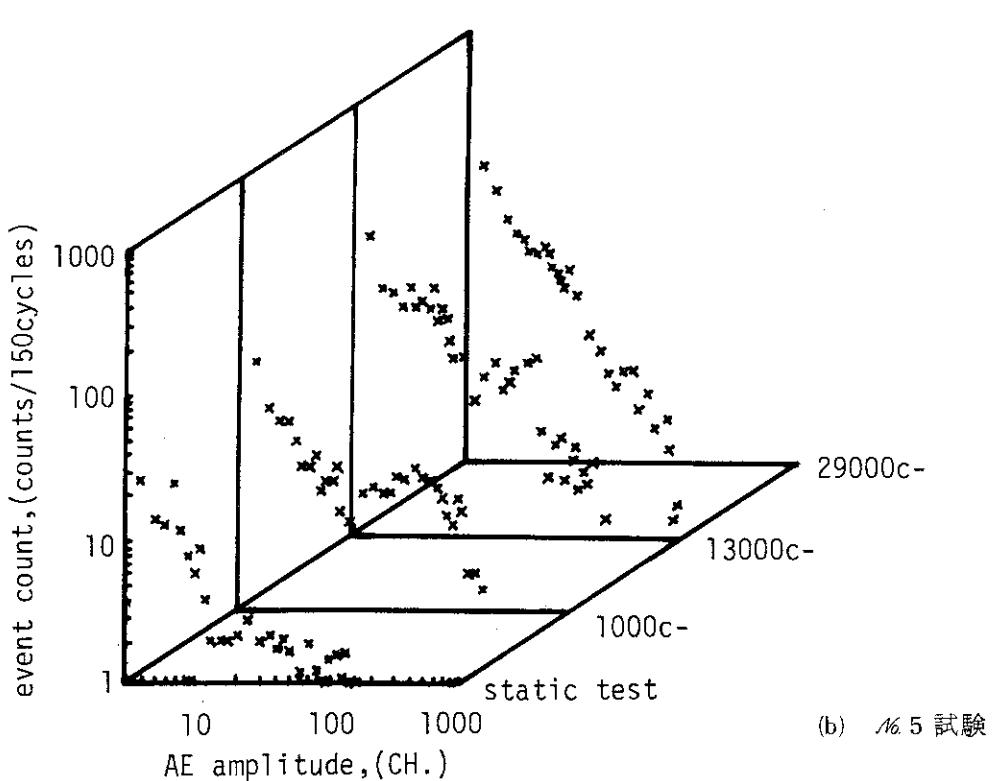
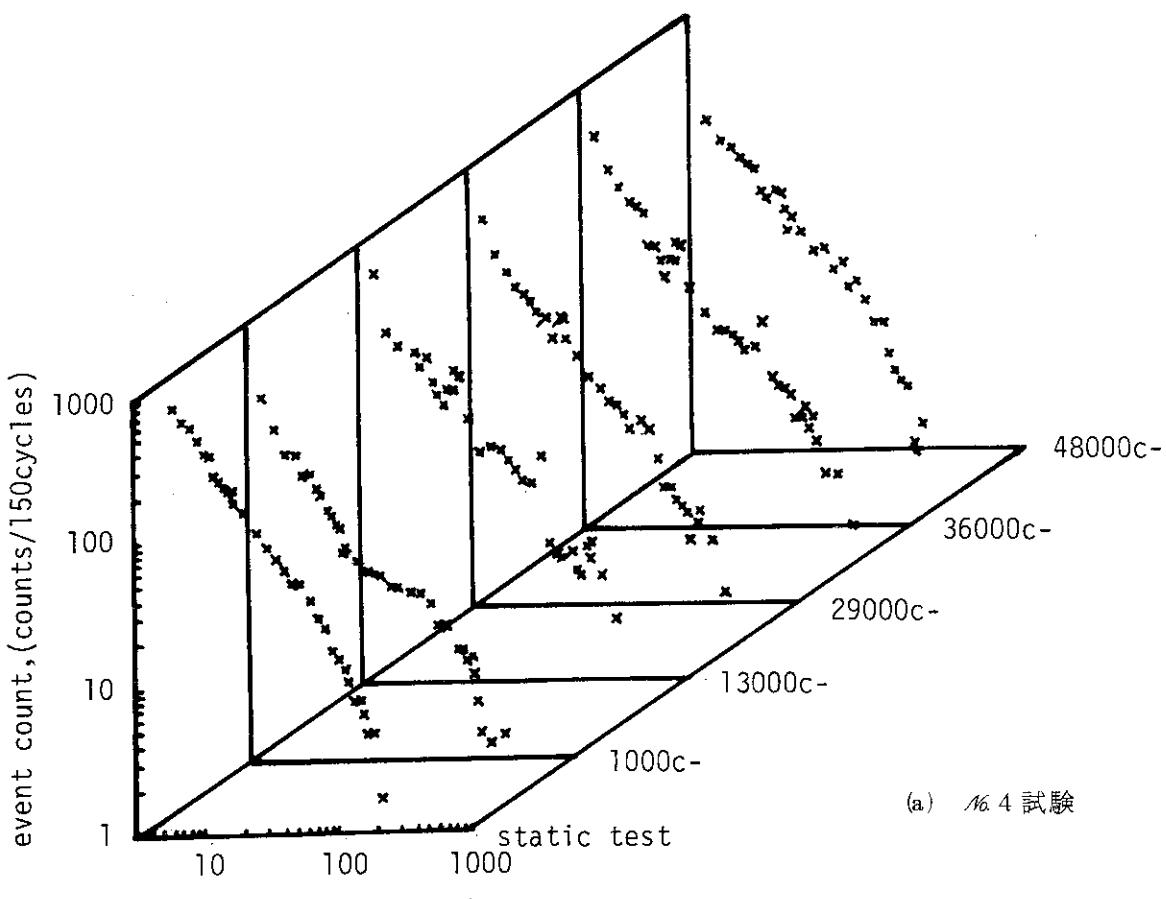


図 3.2.8 インコネル 718 管 N6.4 および N6.5 試験における AE 振幅分布測定例

4. 考察ならびに諸言

以上の各章においては、日本原子力研究所および電力中央研究所のそれぞれの分担項目に関する試験結果がまとめられてきた。それらの中で、内圧疲れ挙動に関するAE監視の観点から見た結果を改めてまとめれば以下の通りである。

(1) 圧力容器モデルおよびNSRR用インコネル718管の内圧疲れ試験とともに、疲れ損傷域におけるAE標定数は、疲れ試験の末期を除き、疲れサイクルの進展と共に増加し、疲れき裂の進展状況と定性的に良い一致をみた。

(2) 疲れ試験末期における疲れ損傷域の1サイクルあたりのAE標定数は、圧力容器およびNSRR用インコネル718管試験ともに低下した。このような傾向は前回共同研究時やその他の疲れ試験時などでも一般に出現しているが、その理由として、疲れき裂によるAE信号の迂回による減衰などが考えられるが、そのような点の確認は今後の課題である。

(3) 疲れき裂の伝播の開始時点は、とくに圧力容器モデル試験の場合にはスマックゲージの計測結果と、AE振幅分布の対数直線勾配の低下およびAE標定数の変化による判定結果とは良い一致を示した。

以上のように、圧力容器モデルおよびインコネル718管の内圧疲れ試験を通じて、疲れき裂伝播に伴なうAE特性のデータ集積および疲れき裂伝播挙動とAE特性との対応関係について貴重な成果が得られたが、一方またモデル構造物加速損傷試験に特有のいくつかの障害も経験した。すなわち、実機に対するAE試験においては、苛酷な環境ノイズと未知の構造損傷への対策という2つの大きな課題があるのに対して、モデル構造物試験においては制御された試験条件下で対象とする構造損傷も既知である点で一見標的を絞りやすいと共に、このような加速損傷試験から得られるAEデータは実機AE試験の評価にとって不可欠な要素でもある。しかし、モデル構造物試験に対してはAE計測システムに課せられる要求条件はほとんど実機に対するものと大差がないと共に、実機とは異質なバックグラウンドノイズの発生の問題が付加されるのが通常である。とくに後者のモデル構造物試験のバックグラウンドノイズの問題は、AE計測が従の立場にある試験では頻発するものであり、しばしば重要なAEデータが採取できない事態も生じる。本試験においても、このような状況を避けることはできなかったが、そのような条件下においても既述したような多くの知見が得られたことは幸いであった。

今後、AE法をさらに有効な損傷監視手段として実用性を高めるためには、位置標定、振幅分布、波形-周波数解析などのAE計測技法の有機的な検討、およびAEデータ評価のためのAE基礎特性の究明、について堅実な努力を積上げて行くことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 原研／電力中研共同報告：「アコースティック・エミッション法による軽水炉圧力容器モデルの内圧疲れき裂伝播の追跡に関する研究」，CRIEPI-74003(1974-6)。
- 2) 藤村 他：J P D R 圧力容器の構造安全性の評価，JAERI 1236, 1974年10月。
- 3) P.Paris and G.Sih: Stress Analysis of Cracks,"
ASTM STP No. 381.
- 4) 仲佐：「音響放出特性を利用する材料診断技法」，電力中研総合報告 No. 29
(1975-11)。