

JAERI - M
83-172

クラック進展に関する A E 特性実験

1983年10月

菊地 章・藤田 操

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 篠高野高速印刷

クラック進展に関する AE 特性実験

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

菊地 章・藤田 操

(1983年9月30日受理)

クラック進展をモニターする AE (Acoustic Emission) の基本的特性を調べるために、1w/o ヨウ素を含むエタノール液雰囲気でジルカロイ管試料に局所的荷重を負荷する実験を行った。その結果、クラック進展の段階が AE 信号の不連続な様相として現われていることを明らかにした。

Experiment of AE Characteristics on Crack Extension

Akira KIKUCHI and Misao FUJITA

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 30, 1983)

For investigating the basic characteristics of acoustic emission (AE) during crack extension, local stress loading tests were performed for zircaloy tube samples at room temperature in the environment of ethanol-1w/o iodine solution. It was clarified from the lots of experiments that the different stages of crack extension were followed by the discontinuous appearance of AE signals.

Keywords : AE, Crack Extension , SCC, Zircaloy Tube, Local Stress,
Loading Test

目 次

1. 序 言	1
2. 実 験	1
2.1 実験用試料	1
2.2 実験装置	1
2.2.1 定荷重圧縮装置	1
2.2.2 AE 検出系	2
2.3 実験法	2
3. 実験結果	3
3.1 AE 信号特性	3
3.2 クラックの様相	4
3.3 破面 SEM 観察	5
4. 考察および今後の課題	5
5. 結 言	6
謝 辞	6
参考文献	7

Contents

1.	Introduction	1
2.	Experimental	1
2.1	Sample	1
2.2	Apparatus	1
2.2.1	Constant load compression apparatus	1
2.2.2	AE detection system	2
2.3	Procedure	2
3.	Results.....	3
3.1	Characteristics of AE signals.....	3
3.2	Aspects of crack	4
3.3	SEM observation of fracture face.....	5
4.	Discussion and Future subjects	5
5.	Conclusion.....	6
	Acknowledgement	6
	References.....	7

1. 序 言

軽水炉燃料の出力変化時に生じ得る PCI/SCC(ペレット・被覆相互作用/応用腐食割れ) 破損挙動に関し、現在、照射試験あるいは炉外実験をとおして多くの情報が得られつつある。しかしながら PCI/SCC 破損の過程、すなわち被覆管内でのクラック進展については未だに機構が確立されていない。この原因はクラックの動的進展を瞬時に計測することの難かしさにある。我々はこの計測のために AE (Acoustic Emission : 音響)法を採用し、既に予備的炉外実験を終了している⁽¹⁾この研究では AE の利用可能性を定性的に明らかにした。しかしながら実験装置および実験法の複雑さのため、簡易な方法でクラックを生じさせ AE 特性を詳しく観察すべき課題を残した。本報に記述する実験はその課題の 1 部を受けたものである。

SCC 実験をできる限り簡易に、かつ数多く実施する必要上、定荷重圧縮装置を作製し、また AE 特性をより詳しく知るために 2 チャンネル式 AE 装置を準備した。クラック進展を生じさせることがまず最初の目標であり、このため B. COX によって既に実施されている実験⁽²⁾におけるヨウ素雰囲気(アルコール内へのヨウ素溶解)を参照利用した。この雰囲気では室温でも SCC を生じさせることができ、本実験研究の目的上、非常に好都合である。なお本実験が軌道に乗るまでに幾多の基本テストを実施し、装置構成の改良などを経ているが、この過程についても次章以降に触れる。

2. 実 験

2.1 実験用試料

実験に用いた試料は BWR 標準型と称されるジルカロイ-2 被覆管(通称 JPDR 用 JP-2 型)である。表面にはオートクレーブ処理により厚さ数ミクロンのジルコニウム酸化膜が形成されている。管の外径は 12.23 mm、肉厚は 0.76 mm で、試料の長さとして約 200 mm を設定した。実験に先立って試料内面をアルコールで洗浄し、付着物を除去した。

2.2 実験装置

2.2.1 定荷重圧縮装置

簡易に、かつ AE 系を容易に設定して実験を行うため、Fig. 1 に示すような定荷重圧縮装置を作製した。ジルカロイ管試料①には押し棒②を界してアーム先端部定荷重⑤の約 4.5 倍の荷重が負荷される。また試料より 200 mm 離れた位置に変位計④(差動トランス式)を配置し、これによって試料に生じる実験中の変位を間接的に計測した。図の上部に試料部分を示す。管の両端にはビニール管⑥を接続し、試料内部をヨウ素 1 w/o のエタノール溶液⑦で充たした。クラック発生の中央部より 50 mm の位置に 2 チャンネル AE 検出系⑧を配置した。AE センサー⑧は導波棒⑨を界して試料からの信号を検出する。なお AE 検出系は管の上、下端にわたって試料にネジ止め圧着し、また AE セ

1. 序 言

軽水炉燃料の出力変化時に生じ得る PCI/SCC(ペレット・被覆相互作用/応用腐食割れ) 破損挙動に関し、現在、照射試験あるいは炉外実験をとおして多くの情報が得られつつある。しかしながら PCI/SCC 破損の過程、すなわち被覆管内でのクラック進展については未だに機構が確立されていない。この原因はクラックの動的進展を瞬時に計測することの難かしさにある。我々はこの計測のために AE (Acoustic Emission : 音響)法を採用し、既に予備的炉外実験を終了している⁽¹⁾この研究では AE の利用可能性を定性的に明らかにした。しかしながら実験装置および実験法の複雑さのため、簡易な方法でクラックを生じさせ AE 特性を詳しく観察すべき課題を残した。本報に記述する実験はその課題の 1 部を受けたものである。

SCC 実験をできる限り簡易に、かつ数多く実施する必要上、定荷重圧縮装置を作製し、また AE 特性をより詳しく知るために 2 チャンネル式 AE 装置を準備した。クラック進展を生じさせることがまず最初の目標であり、このため B. COX によって既に実施されている実験⁽²⁾におけるヨウ素雰囲気(アルコール内へのヨウ素溶解)を参照利用した。この雰囲気では室温でも SCC を生じさせることができ、本実験研究の目的上、非常に好都合である。なお本実験が軌道に乗るまでに幾多の基本テストを実施し、装置構成の改良などを経ているが、この過程についても次章以降に触れる。

2. 実 験

2.1 実験用試料

実験に用いた試料は BWR 標準型と称されるジルカロイ-2 被覆管(通称 JPDR 用 JP-2 型)である。表面にはオートクレーブ処理により厚さ数ミクロンのジルコニウム酸化膜が形成されている。管の外径は 12.23 mm, 肉厚は 0.76 mm で、試料の長さとして約 200 mm を設定した。実験に先立って試料内面をアルコールで洗浄し、付着物を除去した。

2.2 実験装置

2.2.1 定荷重圧縮装置

簡易に、かつ AE 系を容易に設定して実験を行うため、Fig. 1 に示すような定荷重圧縮装置を作製した。ジルカロイ管試料①には押し棒②を界してアーム先端部定荷重⑤の約 4.5 倍の荷重が負荷される。また試料より 200 mm 離れた位置に変位計④(差動トランス式)を配置し、これによって試料に生じる実験中の変位を間接的に計測した。図の上部に試料部分を示す。管の両端にはビニール管⑥を接続し、試料内部をヨウ素 1 w/o のエタノール溶液⑦で充たした。クラック発生の中央部より 50 mm の位置に 2 チャンネル AE 検出系⑧を配置した。AE センサー⑧は導波棒⑨を界して試料からの信号を検出する。なお AE 検出系は管の上、下端にわたって試料にネジ止め圧着し、また AE セ

ンサーはマグネットホルダー⑥により導波棒に圧着させた。

2.2.2 AE 検出系

実験に用いたAE計測装置はNAIS- Σ シリーズ〔昭和電気研究所(株)製〕の2チャンネル構成のものである。Fig. 2 にそのブロックダイアグラムを示す。

被覆管を伝播してきた弾性波(AE波)はAE変換子(型式F-217M絶縁平衡型, 共振周波数170KHz)によって電気信号に変換され, プリアンプ(モデル・4140, 増巾率46dB)で増巾され, さらにメインアンプ(モデル4200)で周波数選択された後増巾され, また振幅弁別(スライサー)されてAE計数パルスとなる。パルスは次いで空間フィルター(モデル4430)によって雑音除去の後位置限定され, 計数器(トータライザー・モデル4401)によってAE事象率, AE事象総数, AE計数率, あるいはAE計数総数が選択的に計数される。チャンネル2のプリアンプからは並列してAE信号がピークボルト計(モデル4220)に入力され, こゝでAE最大波高値が出力される。

本報に述べる実験では空間フィルターをバイパスさせてAE2チャンネルを独立使用した。またプリアンプあるいはメインアンプよりの信号をオシロスコープにインプットし, AE信号波形を実験をとおして観察した。なおAE事象総数およびAE計数総数を経時的に記録した。

2.3 実験法

a) 試料荷重負荷形態

実験の経過に従って試料に直接接触する押し棒および台盤(Fig. 1の②および③)の形状をFig. 3に示すように3種(タイプ1, 2および3)に替えている。タイプ1は管に対して初期的に線(管の長さ方向約15mm)接触する治具である。タイプ2はAE信号の効率を高めることと(絶縁材としてテフロン板を使用), クラックの発生部を限定させること(押し棒長さを約3mmとした)を目的として用いた。最終的には負荷形態として最も理想的なタイプ3(短い押し棒および曲面台盤)を採用した。

押し棒の負荷によって試料は局所的に変形する。その一般的様相をFig. 4に示す。点線図形が実験初期段階であるが, 試料のクリープ変形によって実線図形の様に変形した(図は最終時を示す)。変形量は負荷状態に依るが, 最大0.5mm程度である。この様に経時的に線接触から面接触に変化する現象は, 本実験での体系として避けることのできない点のひとつで, 次章に記述するが, 厳密には応力状態が経時的に変化し, ひいてはクラック進展の方向に影響を与えることになる。

b) 変位特性

定荷重圧縮装置に設けた変位計(Fig. 1④)によって実験系に生じる変位を計測した。Fig. 5に変位経時変化の代表的な数例を挙げる。同図EおよびFはSCC実験中に得た変位曲線である。定荷重38kg時の経時変化で, 変位は時間とともにクリープにより増大している。なお両曲線において点線で囲った範囲ではやゝ急な変位の増大を示すが, 次章で詳述するように, この範囲はAE信号多発部に対応しており, すなわちクラック進展の大きい部分に相当する。曲線Aは不銹鋼(SS)の丸棒を試料に替えた場合の変位であり, 変位に経時変化は生じていない。また曲線Bはヨウ素溶液を除いた場合の試料における変位変化の様相である。以上, 本図にみられる変位の相互比較によって,

変位計の示す計測値が主として管試料自体の変位（但し位置補正を要する）に基づくことが明らかにされた。変位はAE信号同様、クラック進展に関連する重要な事項のひとつであることを知った。

c) 実験

Table 1 に実験の目的および押し棒の型（Fig. 3 参照）を示す。実験No.1～No.21は装置の特性と改良、AEの特性などを調べるために行った予備実験である。No.1～No.3では管内面に初期クラックを設けたが、その必要のないことが判り、No.4以降では初期クラックを設けていない。実験No.21に至るまで種々の特性試験を繰返し、これらによって実験法を確立した。

実験No.22およびNo.25は負荷形態タイプ1（Fig. 3 参照）に依るもので、クラック進展とAE信号との相関を得たはじめてのものである。実験No.25では荷重除荷の効果を調べ、さらに実験後、試料破面のSEM（走査型電顕）観察を行った。No.29およびNo.30はタイプ2に属している。こゝではヨウ素溶液の存在効果、管長さ方向におけるクラックの様相などを調べた。No.32以降はタイプ3に基づいた実験である。AE信号の経時変化とクラック進展の様相を求めた。

3. 実験結果

3.1 AE信号特性

a) 実験No.22およびNo.25

本実験はタイプ1の負荷治具を用いて行っている。管試料の長さ方向約15mmに荷重を荷したため、治具に接触する上、下部かつ長さ15mm弱にわたってクラックが進展していた（次節3.2参照）。

実験中記録したAE事象総数（EV）、AE計数率総数（RD……リングダウン）および変位（Def.）の変化について、定性的模図をFig. 6に示す。本試料では負荷重47kgにしたときAE信号が観察され始めた。EVおよびRDとも実に多く計数され、さらに同図に示すように途中で急激な増大を生じた。この部分ではDef.も増大傾向を示した。

いずれにしても本実験ではAE事象が複雑であり、かつクラック源が多すぎて、研究の目的上実験法を変える必要のある結論に達した。

b) 実験No.32

本実験はタイプ3の負荷治具を用いて行った。治具の改良により、試料内のクラック発生ヶ所を押し棒位置1ヶ所に限定することができ、理想的な体系である。

本実験は約5時間にわたって行ったものであり、この間のAE計数および変位の変化をFig. 7.1～7.3に示す。荷重35kg（試料負荷重157.5kg）に達したときAE信号が観察され始めた。AE事象総数（EV）とAE計数率総数（RD）との相関変化にみられるように1回のAE事象毎にRDは異なる計数率を示している。これはAE事象毎の強度の差異を示すもので、ひいてはクラック長変化の割合あるいはクラック進展上の何等かの変化（たとえばクラックの方向転換）を示しているものと思われる。Fig. 7（Fig. 7.1～7.3）をとおして、(1)AE発生初期段階で2回の鋭いRD立上りの存在すること、(2)以降EVは一様に増大すること、(3)RDには時として大巾な増分の存在すること、(4)荷重を増大してもAEの増分はさ程変化しないこと、(5)大きな変化となる最終段階ではAE増分が

変位計の示す計測値が主として管試料自体の変位（但し位置補正を要する）に基づくことが明らかにされた。変位はAE信号同様、クラック進展に関連する重要な事項のひとつであることを知った。

c) 実験

Table 1 に実験の目的および押し棒の型 (Fig. 3 参照) を示す。実験No.1～No.21は装置の特性と改良、AEの特性などを調べるために行った予備実験である。No.1～No.3では管内面に初期クラックを設けたが、その必要のないことが判り、No.4以降では初期クラックを設けていない。実験No.21に至るまで種々の特性試験を繰返し、これらによって実験法を確立した。

実験No.22およびNo.25は負荷形態タイプ1 (Fig. 3 参照) に依るもので、クラック進展とAE信号との相関を得たはじめてのものである。実験No.25では荷重除荷の効果を調べ、さらに実験後、試料破面のSEM (走査型電顕) 観察を行った。No.29およびNo.30はタイプ2に属している。こゝではヨウ素溶液の存在効果、管長さ方向におけるクラックの様相などを調べた。No.32以降はタイプ3に基づいた実験である。AE信号の経時変化とクラック進展の様相を求めた。

3. 実験結果

3.1 AE信号特性

a) 実験No.22およびNo.25

本実験はタイプ1の負荷治具を用いて行っている。管試料の長さ方向約15mmに荷重を荷したため、治具に接触する上、下部かつ長さ15mm弱にわたってクラックが進展していた (次節3.2参照)。

実験中記録したAE事象総数 (EV)、AE計数率総数 (RD……リングダウン) および変位 (Def.) の変化について、定性的模図を Fig. 6 に示す。本試料では負荷重47kgにしたときAE信号が観察され始めた。EVおよびRDとも実に多く計数され、さらに同図に示すように途中で急激な増大を生じた。この部分では Def. も増大傾向を示した。

いずれにしても本実験ではAE事象が複雑であり、かつクラック源が多すぎて、研究の目的上実験法を変える必要のある結論に達した。

b) 実験No.32

本実験はタイプ3の負荷治具を用いて行った。治具の改良により、試料内のクラック発生ヶ所を押し棒位置1ヶ所に限定することができ、理想的な体系である。

本実験は約5時間にわたって行ったものであり、この間のAE計数および変位の変化を Fig. 7.1～7.3 に示す。荷重35kg (試料負荷重157.5kg) に達したときAE信号が観察され始めた。AE事象総数 (EV) とAE計数率総数 (RD) との相関変化にみられるように1回のAE事象毎にRDは異なる計数率を示している。これはAE事象毎の強度の差異を示すもので、ひいてはクラック長変化の割合あるいはクラック進展上の何等かの変化 (たとえばクラックの方向転換) を示しているものと思われる。Fig. 7 (Fig. 7.1～7.3) をとおして、(1)AE発生初期段階で2回の鋭いRD立上りの存在すること、(2)以降EVは一樣に増大すること、(3)RDには時として大巾な増分の存在すること、(4)荷重を増大してもAEの増分はさ程変化しないこと、(5)大きな変化となる最終段階ではAE増分が

低下すること、などが判る。

c) 実験No.33

本実験では Fig. 8 に示すように荷重を 38 kg にした時 AE 信号が生じ始めた。約 3 分後に EV および RD の増分が急激に増し、約 6 分間程その状態が持続した。この間変位 (Def.) の増分も同様の傾向を示した。以降、EV、RD および Def. ともに一様の増大傾向を示したが、実験No.32 同様、RD は時として大きな増分を示した。なお本実験は 80 分程で打ちきっている。

d) 実験No.34

本実験は実験No.33 の再現実験である。Fig. 9 に結果を示す。この場合、定荷重 38 kg 到達後約 9 分後に RD の大きな増分が 1 回だけ存在した。実験は約 60 分で打ちきっている。

e) 実験No.29

本実験はタイプ 2 の負荷治具を用いて行ったもので、AE 信号発生 of ヨウ素溶液効果を求めるための実験である。Fig. 10 に示すように 390 分まで AE 信号の発生持続を確認した後、ヨウ素溶液を除去すると、以降 45 分程 AE 信号の発生をみた後、完全に発生しなくなった。なお図にみられる除去時の急激な立上りは雑音である。

3.2 クラックの様相

実験終了後、押し棒接触部中央ヶ所を輪切りし、エミリー紙 (#800-#1000-#1200) で研磨仕上げして断面の顕微鏡観察を行った。

実験No.22 の試料には Fig. 11 にみられるような初期クラック (長さ約 $25 \mu\text{m}$) のみが押し棒下部位置に存在した。クラックは管の周方向に進展している。

一方、実験No.25 の試料では、前述の初期クラックがさらに進展していた。Fig. 12 にクラックの様相を示す。クラックは管肉厚の $1/3$ あたりまでは管の径方向に進展しているが、それ以降は大きく方向を変え、むしろ管の周方向に近い方向へと進展している。本実験で得たこの様なクラック進展方向の様相は各実験共通のものである。クラックの方向転換はその位置における局所的応力状態の変化によるものと想像され、この変化は試料の変位に依存するものと考えている。

AE 信号とクラック進展の対応的観点にたつと、クラックの管長さ方向の分布を知る必要がある。Fig. 13 は実験No.30 の試料についての管長さ方向におけるクラックの様相を示したものである。この実験はタイプ 2 の負荷治具を用いて行ったもので、押し棒は試料に対し面接触をしている。同図 A にみられる 2ヶ所からのクラック発生はこの面接触による応力状態に起因したものであると思われる。同図は A を基点として、約 $200 \mu\text{m}$ の長さ毎に観察した結果である。位置 C、D および F の写真はほぼ同様のクラック形状を示しているが押し棒の両端部近辺 (写真 A および G、H) では様相が異っている。なお写真 A および B にみられる 2本のクラックのうち 1本 (右側) は押し棒の中央部で消えている。AE 信号との対応とゆう本来の目的からするとクラックはできる限り単一のものが望ましい。この意味からするとタイプ 2 の負荷治具方式はあまりよくないことになる。

Fig. 14 は実験No.32 の試料 (タイプ 3 負荷治具方式) におけるクラックの様相である。写真 A は押し棒の中央、B は端部の様相である。また Fig. 15 は実験No.33 の場合の様相である。ここではほぼ径方向にクラックが進展し、停止している。

3.3 破面 SEM 観察

本実験の全てにおいて、試料内面に発したクラックは管の中央部で停止している（未貫通クラック）。実験終了後クラック部を押し広げ、その破面を観察した。Fig. 1 6.1, 1 6.2 および 1 6.3 に実験 No. 2 5 で得られた試料における SEM 写真の例を示す。

Fig. 1 6.1 の A, B あるいは Fig. 1 6.2 の A は管試料内面（下端）より外面（上端）にかけてのフラクトグラフである。管外面方向約 3 分の 2（肉厚）付近にひとつの層境界がみられる。この位置近辺の拡大写真（Fig. 1 6.1, C）にみられるように外面側には延性破面を示すディンプルが存在する。これは管の押し広げの際生じたもので、すなわちこの境界が進展クラックの先端であることを意味している。

Fig. 1 6.1 ~ 1 6.3 の各拡大写真が示すように、クラック面にはへき開およびフルーティングが観察され、実験で得たクラックが SCC（雰囲気は 1 w/o ヨウ素を含むエタノール液）であることを示している。

4. 考察および今後の課題

ヨウ素を 1 w/o 含んだエタノール中でジルカロイ管に局所的荷重を負荷することにより、室温で試料に SCC を生じさせることができた。クラック面の SEM 観察によると、SCC 特有の見事なへき開プラスフルーティングが現われている。このことからすると実験頭初の目標であった、“簡易に SCC を発生させること”は、成功裡に達成された。最大の魅力は室温でも SCC を生じ得ることで、次の目標とした、“AE 特性を簡易に調べること”が、高頻度で可能となった。

しかしながら、前章に述べたように、SCC によるクラックの進展の様相を金相により観察したところ、クラックは発生初期に径方向に伝播するものの、それも管肉厚の約 3 分の 1 までであり、以降、径方向とある角度を持って伝播している。さらにその異方向伝播も肉厚の約 3 分の 2 まで停止している。この異方向伝播は実験の頭初、予想しなかったことのひとつである。

クラックの異方向伝播の理由は実験によって明らかにされた。本実験の体系（装置、試料の構成を含めて）からして、クラックは比較的大きな応力負荷（ほとんど降伏応力に近い）のとき伝播を開始するものと察せられる。この応力状態で試料の局所的負荷部にクリープを生じ、試料には経時的に変形が生じる。変形がかなり大きくなると局所的負荷部における応力状態が変化し得る。多分、クラックの異方向伝播の始まる場所がこの応力状態の変化の開始に対応するのであろう。また、変形についてはひとつの実験事実がある。変位計の指示した値は試料のみからくることを確認しているが、実験の定荷重状態で変位の増分が一時急激に大きくなることを全実験をとおして経験している。この時点における AE 事象は多発していることを考えると、変位の急激な増大はクラックが局部的に大きく進展したことによると察せられる。いずれにしても、試料の変位（クリープおよびクラック進展に起因）を妨ぐことはできなかった。

クラックの伝播の様相は径方向および異方向よりなるが、これら全ての伝播の過程に対して、AE 信号の発生することを確認した。AE 計数では経時的に増分を変化する場合があり、これらの時点がクラック進展過程の特殊な位置に対応しているはずである。この面から AE 計数の変化の様相を金相

3.3 破面 SEM 観察

本実験の全てにおいて、試料内面に発したクラックは管の中央部で停止している（未貫通クラック）。実験終了後クラック部を押し広げ、その破面を観察した。Fig. 1 6.1, 1 6.2 および 1 6.3 に実験 No. 2 5 で得られた試料における SEM 写真の例を示す。

Fig. 1 6.1 の A, B あるいは Fig. 1 6.2 の A は管試料内面（下端）より外面（上端）にかけてのフラクトグラフである。管外面方向約 3 分の 2（肉厚）付近にひとつの層境界がみられる。この位置近辺の拡大写真（Fig. 1 6.1, C）にみられるように外面側には延性破面を示すディンプルが存在する。これは管の押し広げの際生じたもので、すなわちこの境界が進展クラックの先端であることを意味している。

Fig. 1 6.1 ~ 1 6.3 の各拡大写真が示すように、クラック面にはへき開およびフルーティングが観察され、実験で得たクラックが SCC（雰囲気は 1 w/o ヨウ素を含むエタノール液）であることを示している。

4. 考察および今後の課題

ヨウ素を 1 w/o 含んだエタノール中でジルカロイ管に局所的荷重を負荷することにより、室温で試料に SCC を生じさせることができた。クラック面の SEM 観察によると、SCC 特有の見事なへき開プラスフルーティングが現われている。このことからすると実験頭初の目標であった、“簡易に SCC を発生させること”は、成功裡に達成された。最大の魅力は室温でも SCC を生じ得ることで、次の目標とした、“AE 特性を簡易に調べること”が、高頻度で可能となった。

しかしながら、前章に述べたように、SCC によるクラックの進展の様相を金相により観察したところ、クラックは発生初期に径方向に伝播するものの、それも管肉厚の約 3 分の 1 までであり、以降、径方向とある角度を持って伝播している。さらにその異方向伝播も肉厚の約 3 分の 2 まで停止している。この異方向伝播は実験の頭初、予想しなかったことのひとつである。

クラックの異方向伝播の理由は実験によって明らかにされた。本実験の体系（装置、試料の構成を含めて）からして、クラックは比較的大きな応力負荷（ほとんど降伏応力に近い）のとき伝播を開始するものと察せられる。この応力状態で試料の局所的負荷部にクリープを生じ、試料には経時的に変形が生じる。変形がかなり大きくなると局所的負荷部における応力状態が変化し得る。多分、クラックの異方向伝播の始まる場所がこの応力状態の変化の開始に対応するのであろう。また、変形についてはひとつの実験事実がある。変位計の指示した値は試料のみからくることを確認しているが、実験の定荷重状態で変位の増分が一時急激に大きくなることを全実験をとおして経験している。この時点における AE 事象は多発していることを考えると、変位の急激な増大はクラックが局部的に大きく進展したことによると察せられる。いずれにしても、試料の変位（クリープおよびクラック進展に起因）を妨ぐことはできなかった。

クラックの伝播の様相は径方向および異方向よりなるが、これら全ての伝播の過程に対して、AE 信号の発生することを確認した。AE 計数では経時的に増分を変化する場合があります、これらの時点がクラック進展過程の特殊な位置に対応しているはずである。この面から AE 計数の変化の様相を金相

によるクラックの様相と対応づけてみたが、径方向のクラック長が短かく、結果的には定量的対応を得るには至らなかった。しかしながらAE 計数の不連続な変化がクラック進展のある段階に対応していることはかなりの確かさをもって認めることができる。

以上の検討より今後の実験課題が生じる。根本的には実験体系の改良あるいは実験法の修正であり、クリープによる変形を極力押えるか、あるいは変形を生じても応力状態の不変なものとするかに集約される。本実験ではAE とクラックの定性的関連を明らかにしたが、定量的には失敗した。この原因はクラックの中が変形と共に広がり、かつクラック挙動の観察で重視すべきクラック面が雰囲気（ヨウ素とエタノールの混合液）によって腐食され、クラック面の原形をとらめなかったことにある。この現象が改良されれば研究の目的が100%達成されることになり、その実現性が本実験をとおして充分予想される。

5. 結 言

- 1) 簡易にAE 特性実験を行うため、定荷重圧縮装置を試作した。
- 2) 装置を用い、ヨウ素1w/oを含むエタノール液に試料内面を浸し、室温で局所的荷重負荷実験を行った。
- 3) その結果、試料（ジルカロイ管）内面よりクラックが伝播した。クラックは典型的なSCCによることをSEM（走査型電顕）で確認した。
- 4) クラックは肉厚の約3分の1まで径方向に伝播したが、それより約3分の2までは異方向に伝播し、そこで停止した。
- 5) この伝播異方向性は実験中の試料内応力状態の変化に起因し、またそれは試料の変形（クリープあるいはクラック伝播による）によることが想定された。
- 6) クラック伝播の全過程をとおしてAE 信号が検出された。
- 7) AE 信号の計数は時として急増する場合があり、この不連続な様相がクラック伝播の特殊状態に対応することを定性的に推察できた。
- 8) しかしながら定量的に対応づけるには至らず、そのための実験手段を実験結果より想定し得た。
- 9) いずれにしろ本実験によってAE のクラック伝播挙動解析への応用がほぼ100%可能であることを確認できた。

謝 辞

本実験を行うにあたり、種々の面で御協力をいただいた燃料安全第一研究室および第三研究室の諸兄に謝意を表したい。

によるクラックの様相と対応づけてみたが、径方向のクラック長が短かく、結果的には定量的対応を得るには至らなかった。しかしながらAE 計数の不連続な変化がクラック進展のある段階に対応していることはかなりの確かさをもって認めることができる。

以上の検討より今後の実験課題が生じる。根本的には実験体系の改良あるいは実験法の修正であり、クリープによる変形を極力押えるか、あるいは変形を生じても応力状態の不変なものとするかに集約される。本実験ではAE とクラックの定性的関連を明らかにしたが、定量的には失敗した。この原因はクラックの中が変形と共に広がり、かつクラック挙動の観察で重視すべきクラック面が雰囲気（ヨウ素とエタノールの混合液）によって腐食され、クラック面の原形をとらめなかったことにある。この現象が改良されれば研究の目的が100%達成されることになり、その実現性が本実験をとおして充分予想される。

5. 結 言

- 1) 簡易にAE 特性実験を行うため、定荷重圧縮装置を試作した。
- 2) 装置を用い、ヨウ素1w/oを含むエタノール液に試料内面を浸し、室温で局所的荷重負荷実験を行った。
- 3) その結果、試料（ジルカロイ管）内面よりクラックが伝播した。クラックは典型的なSCCによることをSEM（走査型電顕）で確認した。
- 4) クラックは肉厚の約3分の1まで径方向に伝播したが、それより約3分の2までは異方向に伝播し、そこで停止した。
- 5) この伝播異方向性は実験中の試料内応力状態の変化に起因し、またそれは試料の変形（クリープあるいはクラック伝播による）によることが想定された。
- 6) クラック伝播の全過程をとおしてAE 信号が検出された。
- 7) AE 信号の計数は時として急増する場合があり、この不連続な様相がクラック伝播の特殊状態に対応することを定性的に推察できた。
- 8) しかしながら定量的に対応づけるには至らず、そのための実験手段を実験結果より想定し得た。
- 9) いずれにしろ本実験によってAE のクラック伝播挙動解析への応用がほぼ100%可能であることを確認できた。

謝 辞

本実験を行うにあたり、種々の面で御協力をいただいた燃料安全第一研究室および第三研究室の諸兄に謝意を表したい。

によるクラックの様相と対応づけてみたが、径方向のクラック長が短かく、結果的には定量的対応を得るには至らなかった。しかしながらAE 計数の不連続な変化がクラック進展のある段階に対応していることはかなりの確かさをもって認めることができる。

以上の検討より今後の実験課題が生じる。根本的には実験体系の改良あるいは実験法の修正であり、クリープによる変形を極力押えるか、あるいは変形を生じても応力状態の不変なものとするかに集約される。本実験ではAE とクラックの定性的関連を明らかにしたが、定量的には失敗した。この原因はクラックの中が変形と共に広がり、かつクラック挙動の観察で重視すべきクラック面が雰囲気（ヨウ素とエタノールの混合液）によって腐食され、クラック面の原形をとらめなかったことにある。この現象が改良されれば研究の目的が100%達成されることになり、その実現性が本実験をとおして充分予想される。

5. 結 言

- 1) 簡易にAE 特性実験を行うため、定荷重圧縮装置を試作した。
- 2) 装置を用い、ヨウ素1w/oを含むエタノール液に試料内面を浸し、室温で局所的荷重負荷実験を行った。
- 3) その結果、試料（ジルカロイ管）内面よりクラックが伝播した。クラックは典型的なSCCによることをSEM（走査型電顕）で確認した。
- 4) クラックは肉厚の約3分の1まで径方向に伝播したが、それより約3分の2までは異方向に伝播し、そこで停止した。
- 5) この伝播異方向性は実験中の試料内応力状態の変化に起因し、またそれは試料の変形（クリープあるいはクラック伝播による）によることが想定された。
- 6) クラック伝播の全過程をとおしてAE 信号が検出された。
- 7) AE 信号の計数は時として急増する場合があり、この不連続な様相がクラック伝播の特殊状態に対応することを定性的に推察できた。
- 8) しかしながら定量的に対応づけるには至らず、そのための実験手段を実験結果より想定し得た。
- 9) いずれにしろ本実験によってAE のクラック伝播挙動解析への応用がほぼ100%可能であることを確認できた。

謝 辞

本実験を行うにあたり、種々の面で御協力をいただいた燃料安全第一研究室および第三研究室の諸兄に謝意を表したい。

参 考 文 献

1. 菊地 章, 中条唯人, "ジルカロイ管内のクラック進展とAEによる観察", JAERI-M 83-001 (1983年2月)
2. B. Cox, "A Correlation Between Acoustic Emission During SCC and Fractography of Cracking of the Zircalloys", Corrosion - NACE Vol. 30, No.6 (June, 1974)

Table 1 Test-objectives and types of push rod

Test No.	Objective	Type of push rod **
No. 1 - No. 21	Preliminary tests on AE signals, crack formation, improvements of apparatus etc.	1
No. 22	Observation of initial crack	1
No. 25	SEM observation of fracture face and off-load test	1
No. 29	Off-iodine test	2
No. 30	Crack aspects at tube-axial positions	2
No. 32	Long period test	3
No. 33	Short period test	3
No. 34	Short period test	3

** Reference...Fig. 3

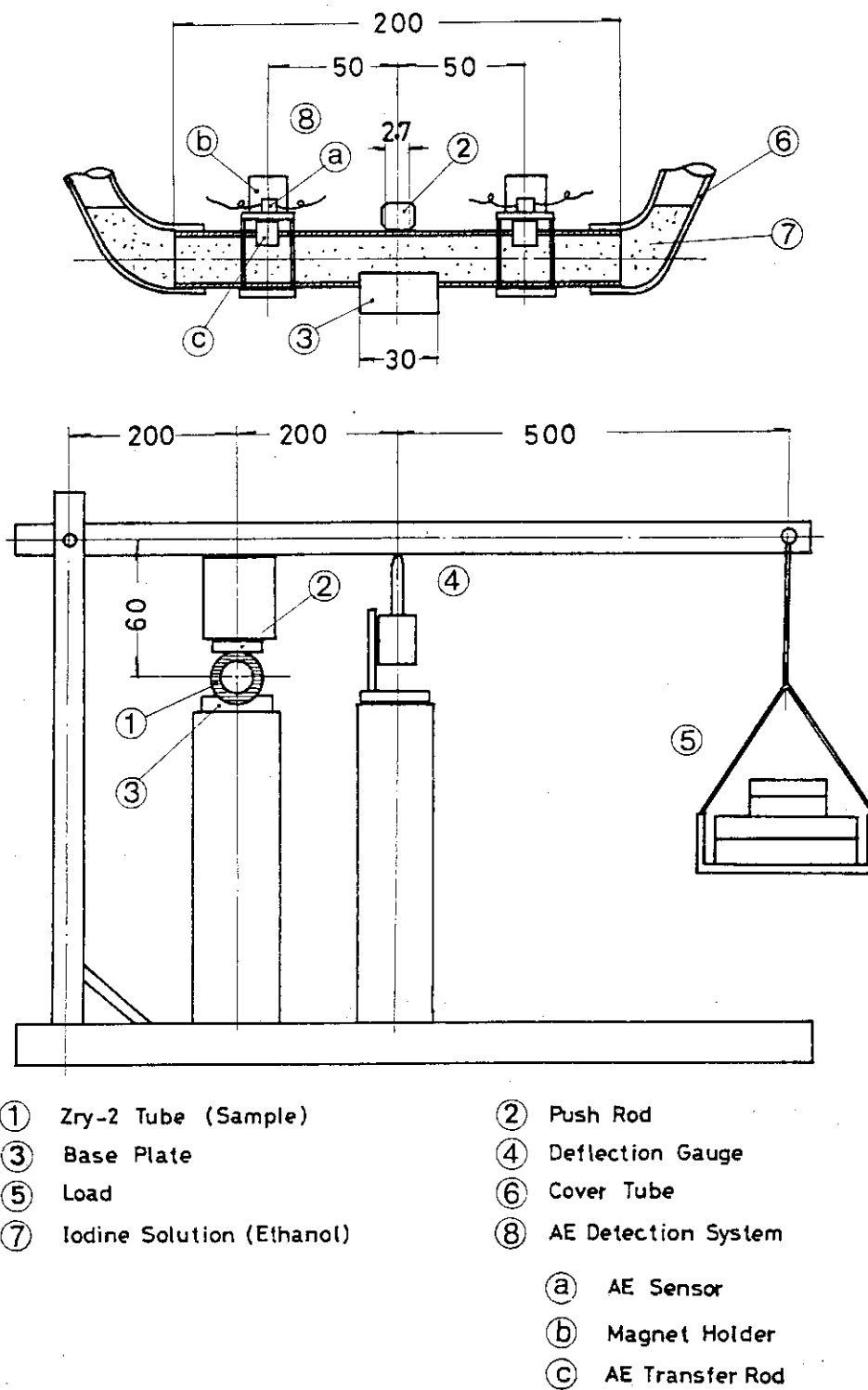
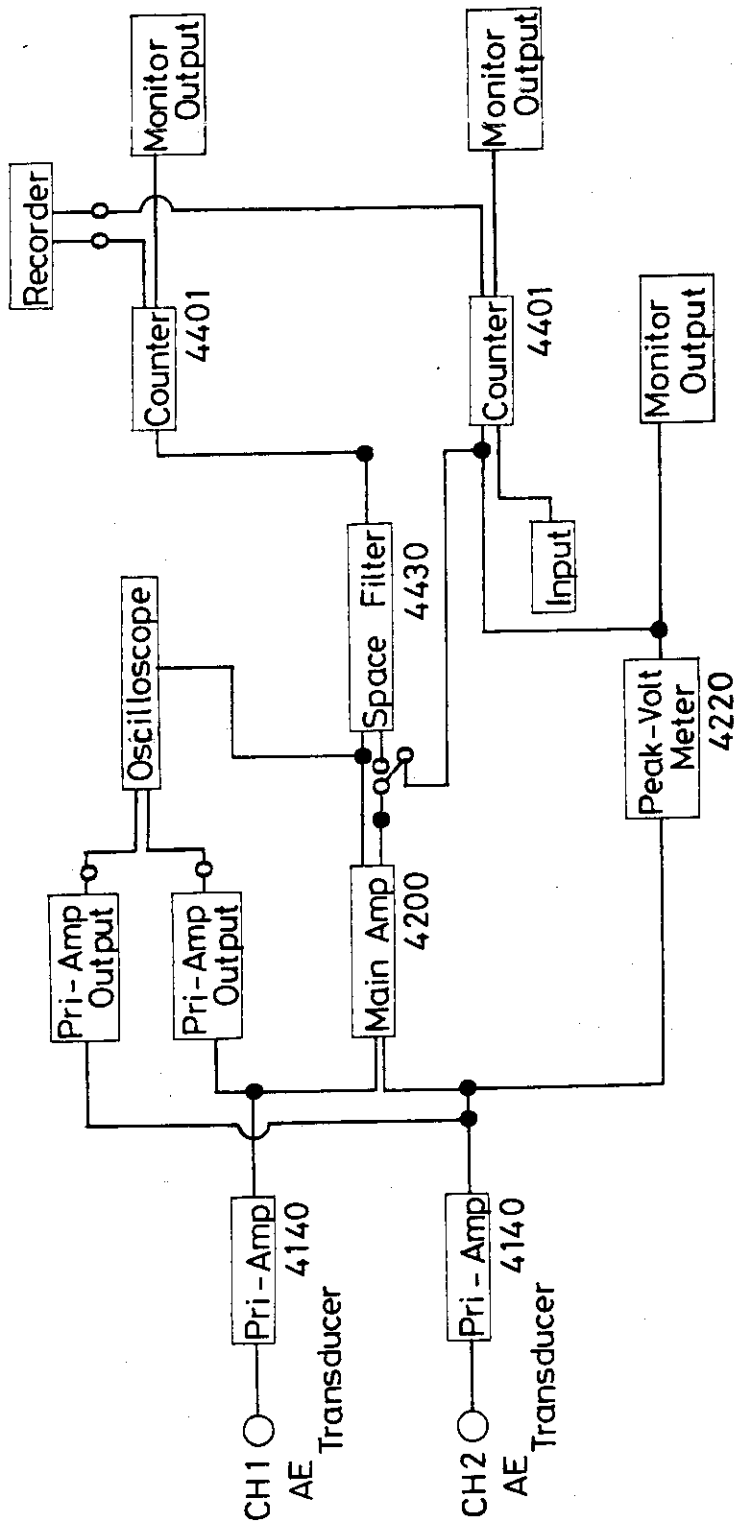


Fig. 1 Structural drawing of experimental apparatus



Block diagram in AE apparatus

Fig. 2 Block diagram in AE detection system

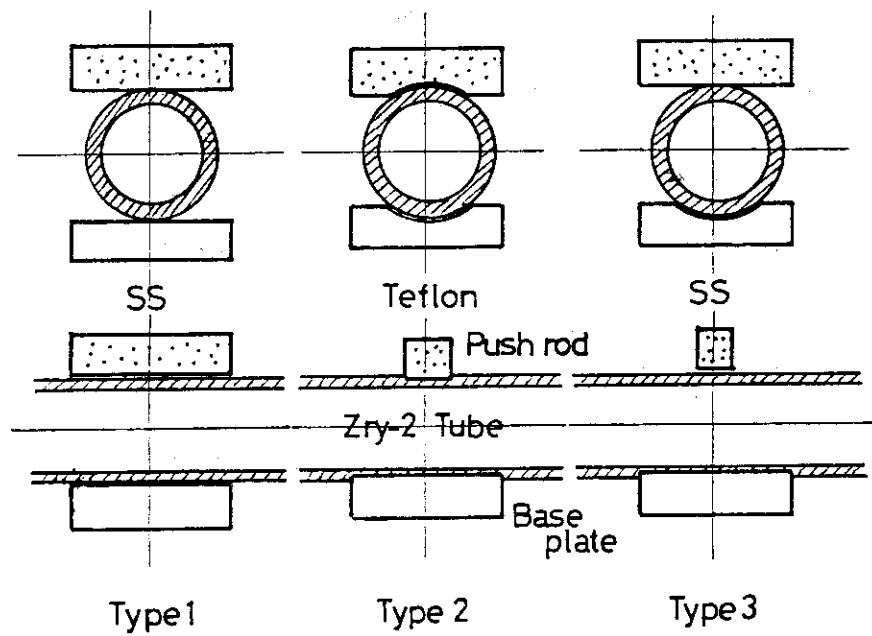


Fig. 3 Three kinds of loading procedures used in the experiments

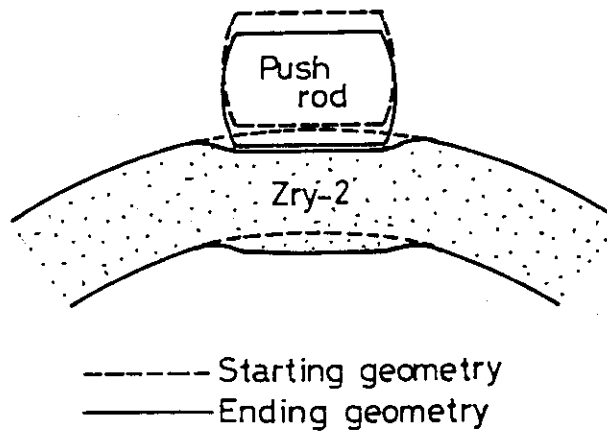


Fig. 4 Local deformation of sample during experiment

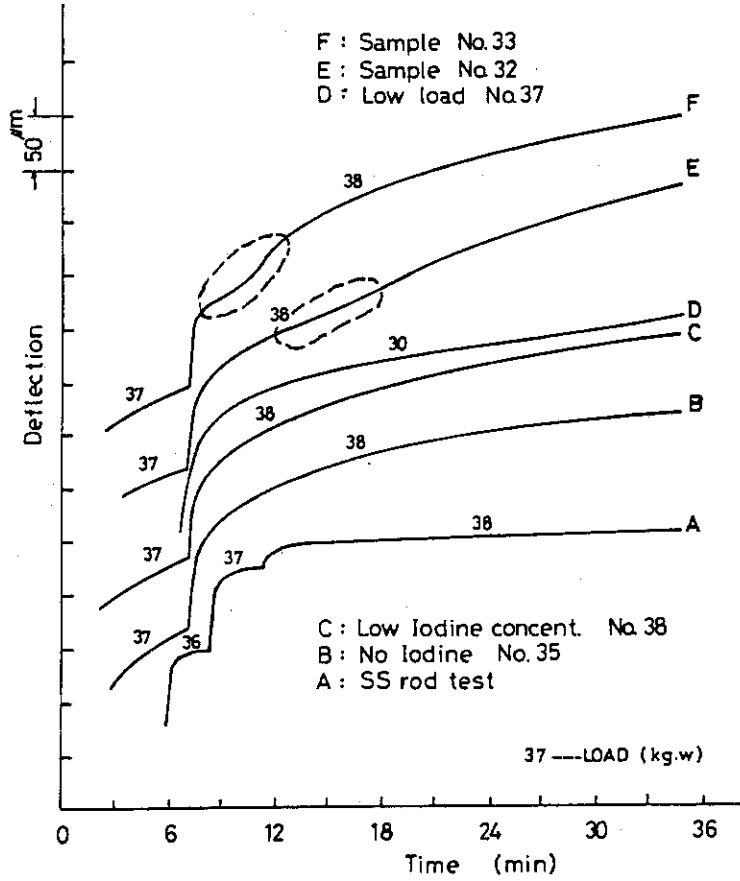


Fig. 5 Typical change of deflection with time

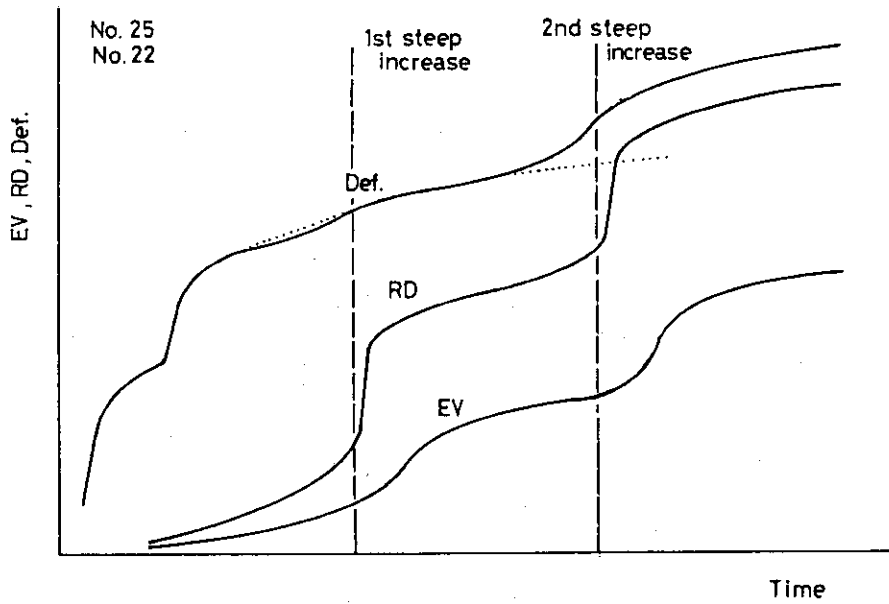


Fig. 6 Schematic drawings of deflection (Def), total AE counts (RD) and AE event (EV) in the tests No.22 and No.25

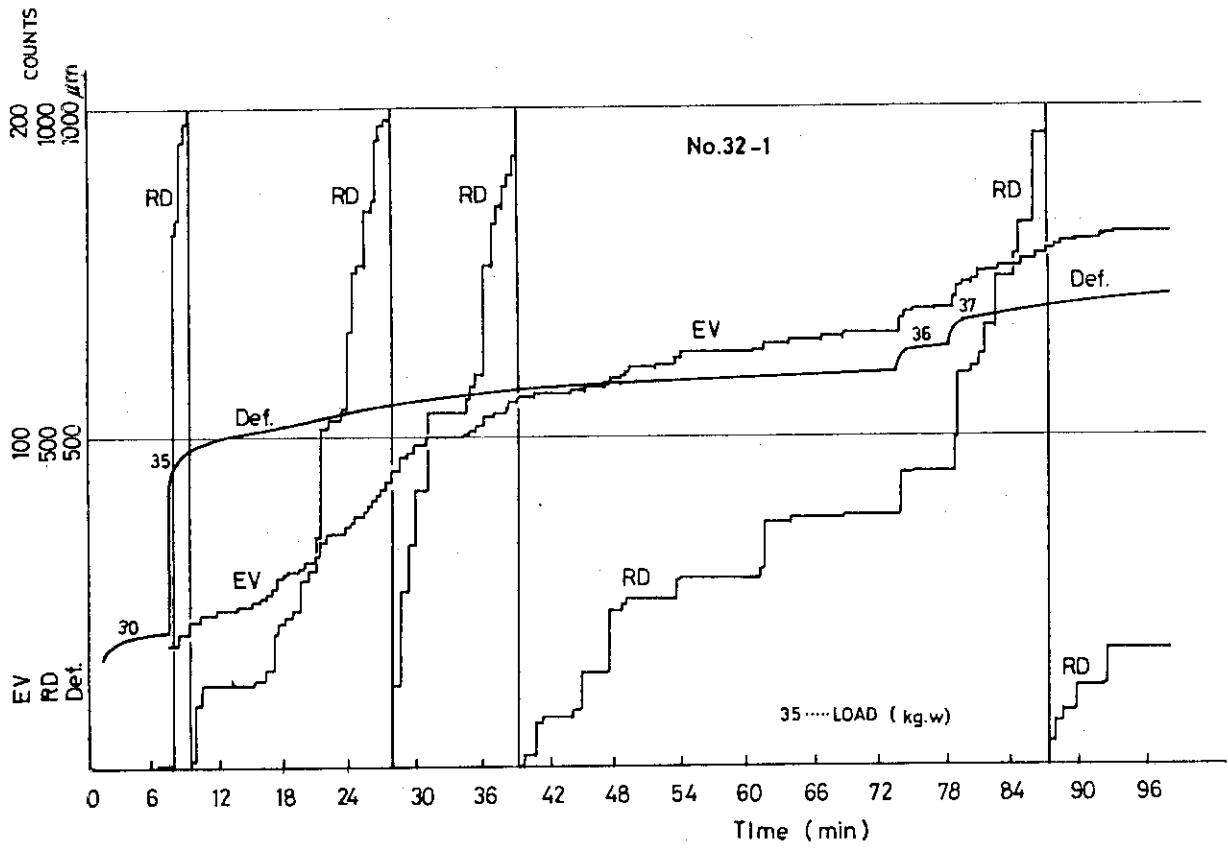


Fig. 7.1 AE signals in the early stage of the test No.32

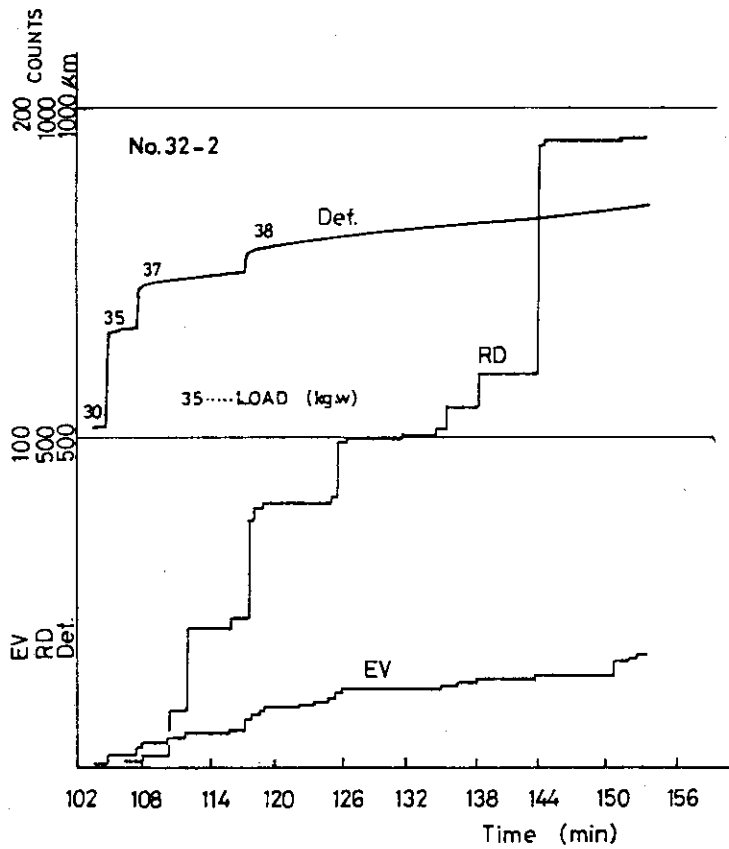


Fig. 7.2 AE signals in the middle stage of the test No.32

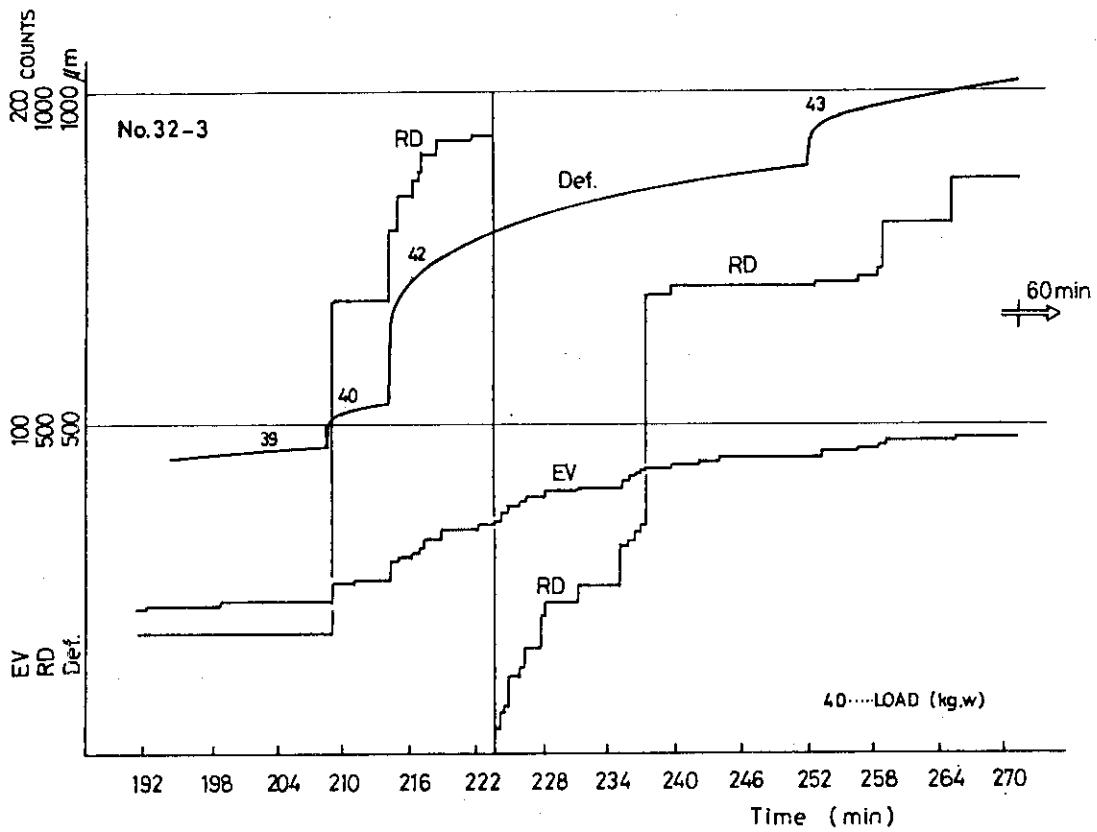


Fig. 7.3 AE signals in the final stage of the test No.32

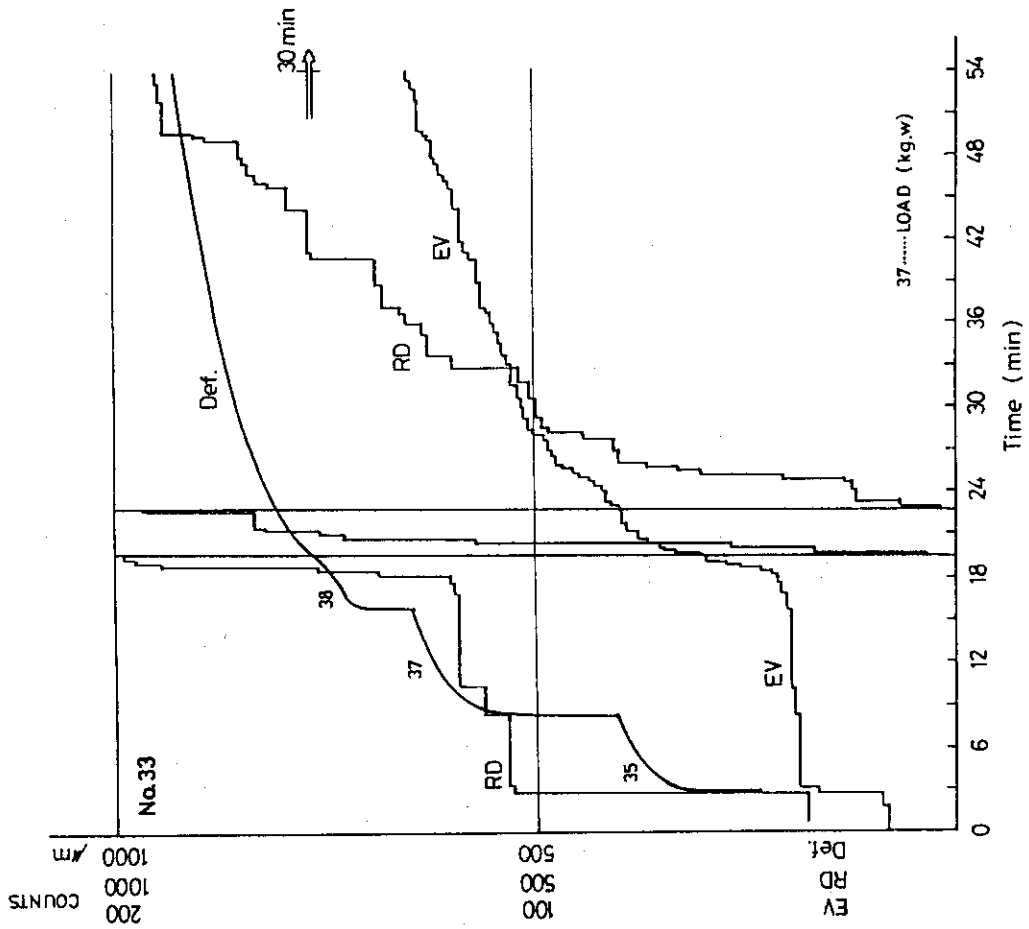


Fig. 8 AE signals detected in the test No.33

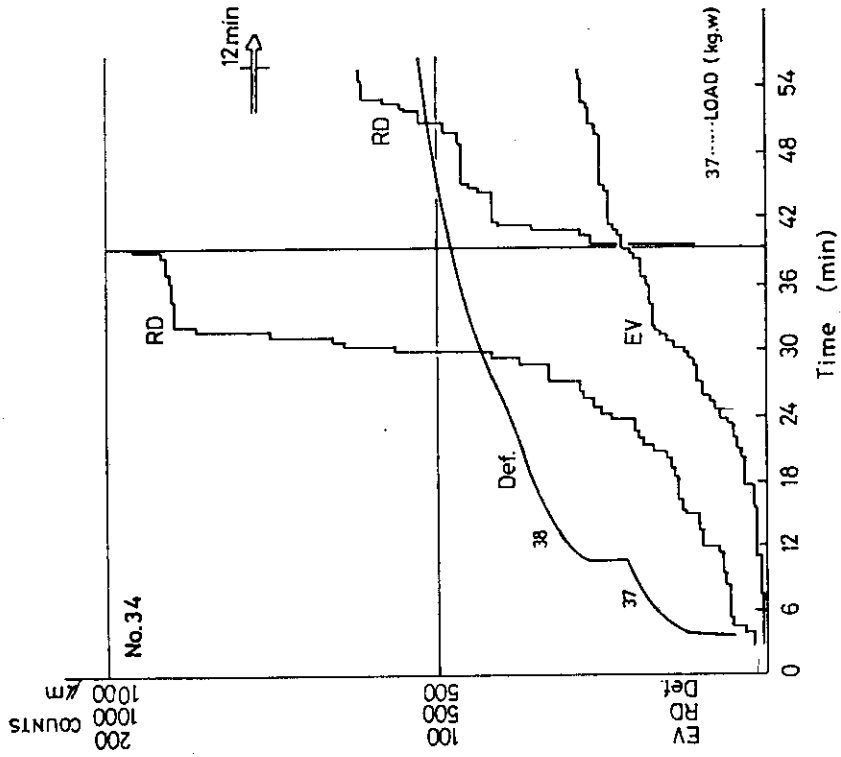


Fig. 9 AE signals detected in the test No.34

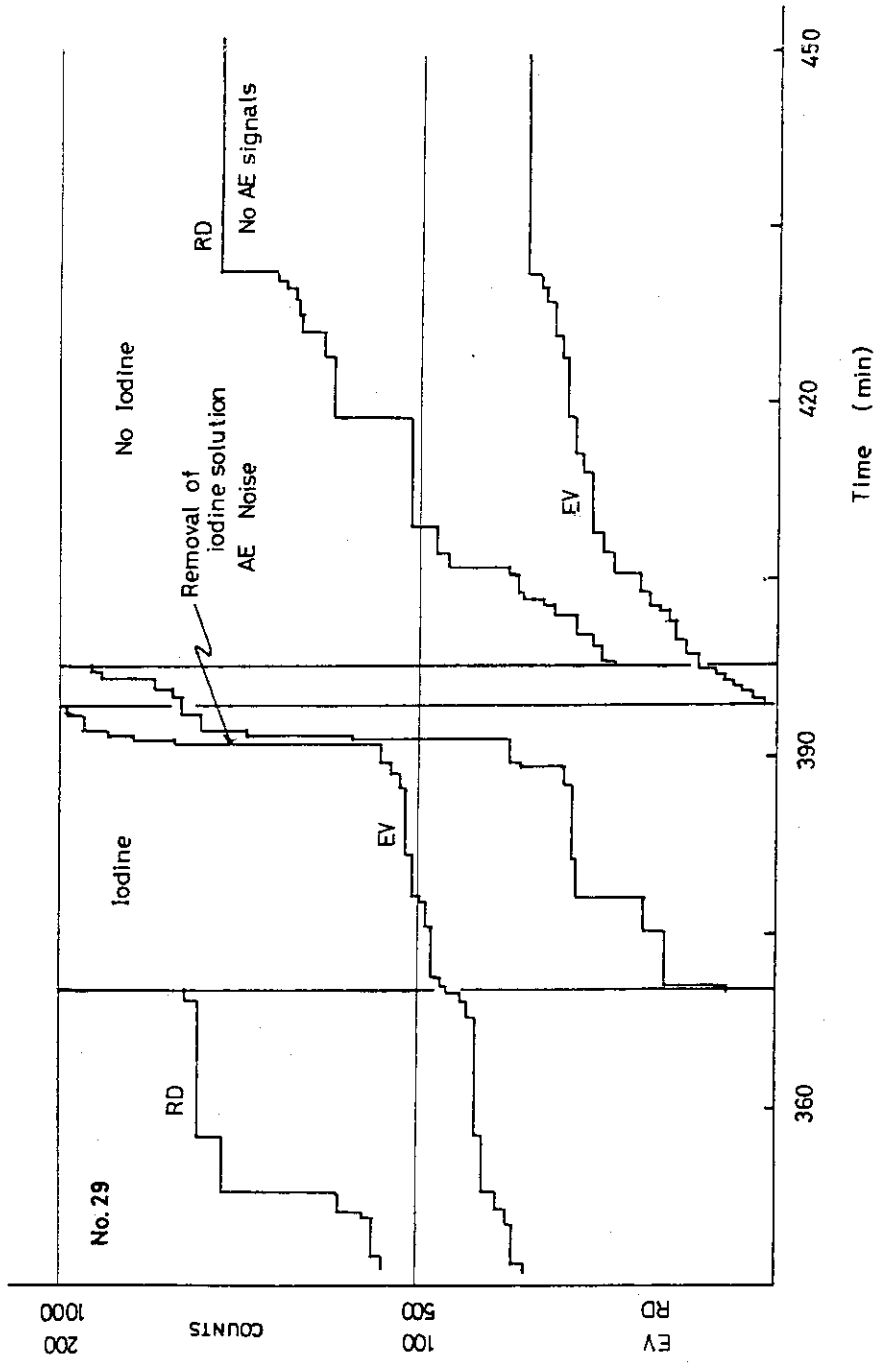


Fig. 10 Effect of iodine solution on AE signals obtained in the test No.29

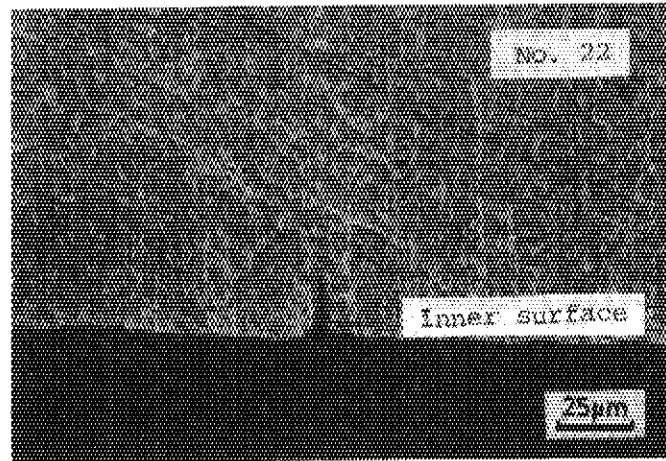


Fig. 11 Initial crack observed in the test No.22

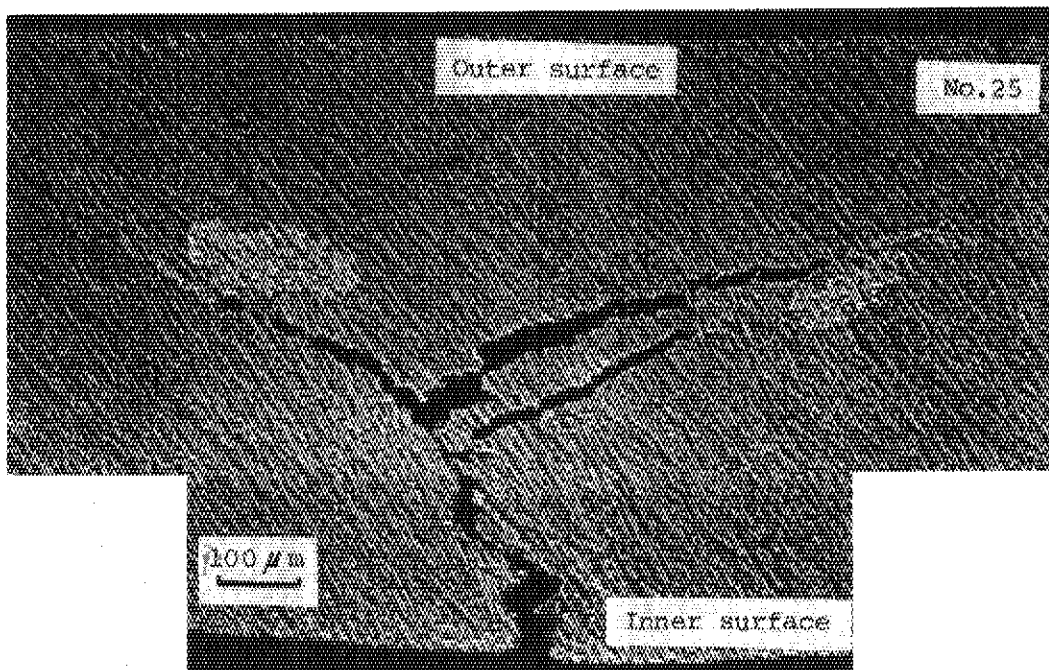


Fig. 12 Typical aspect of extended crack in the test No.25

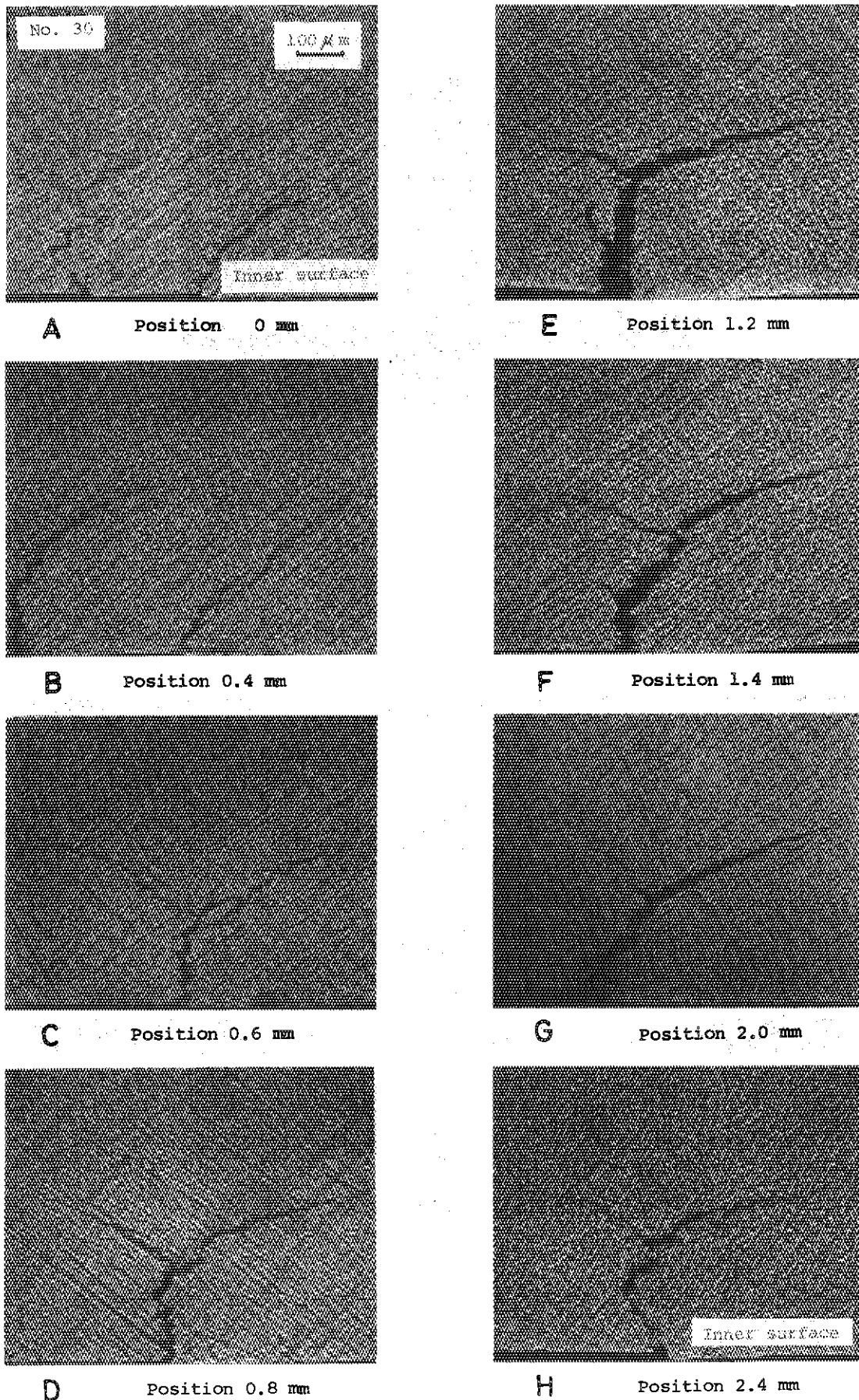


Fig. 13 Changes of crack shape along axial direction of sample (Test No.30)

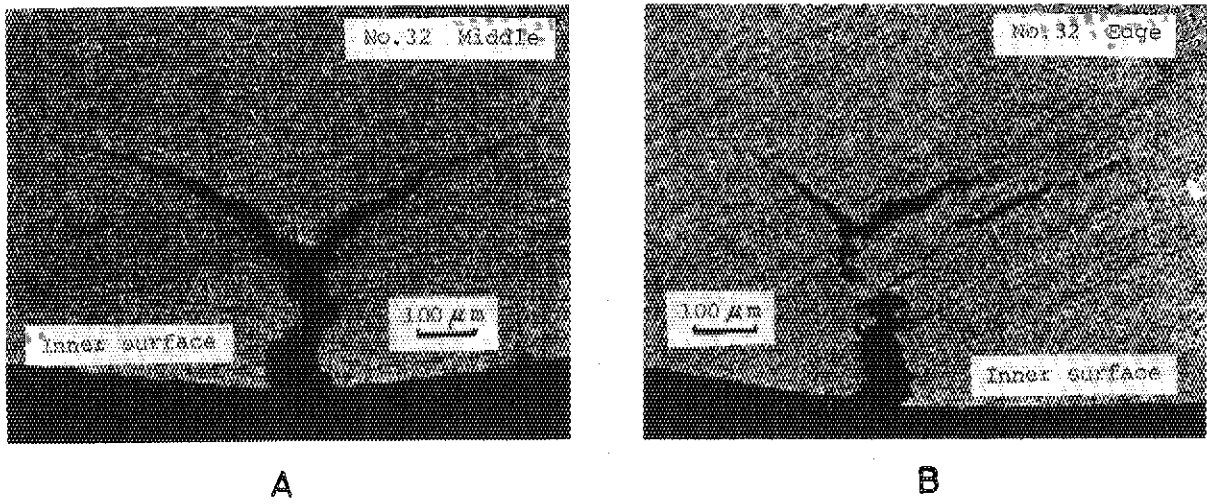


Fig. 14 Crack shape observed in the test 32

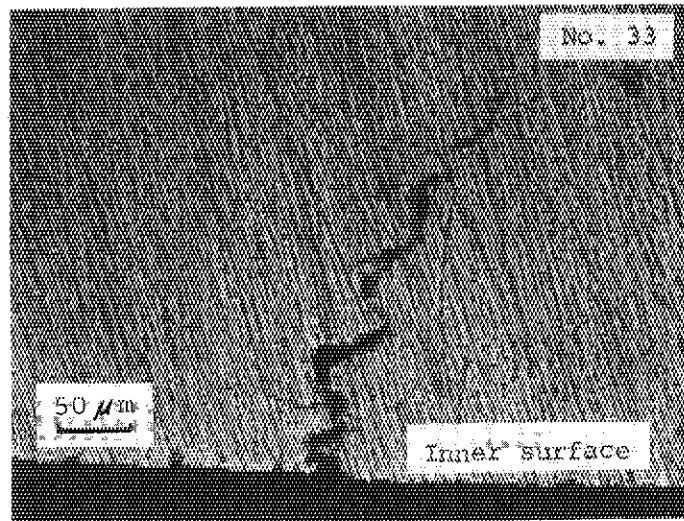


Fig. 15 Crack aspect observed in the test No.33

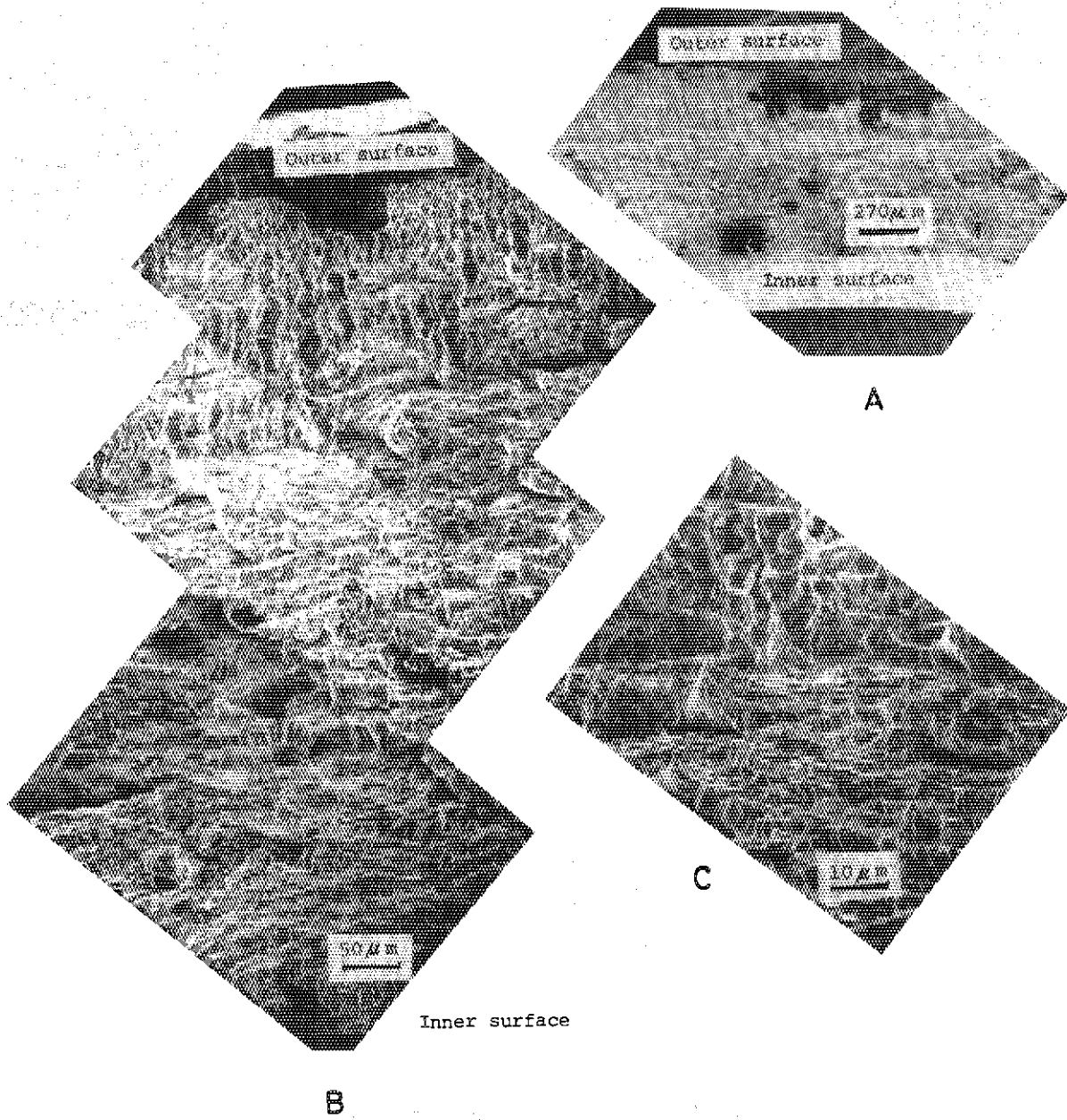


Fig. 16.1 SEM observation of cracked face in the test No.25 Whole view

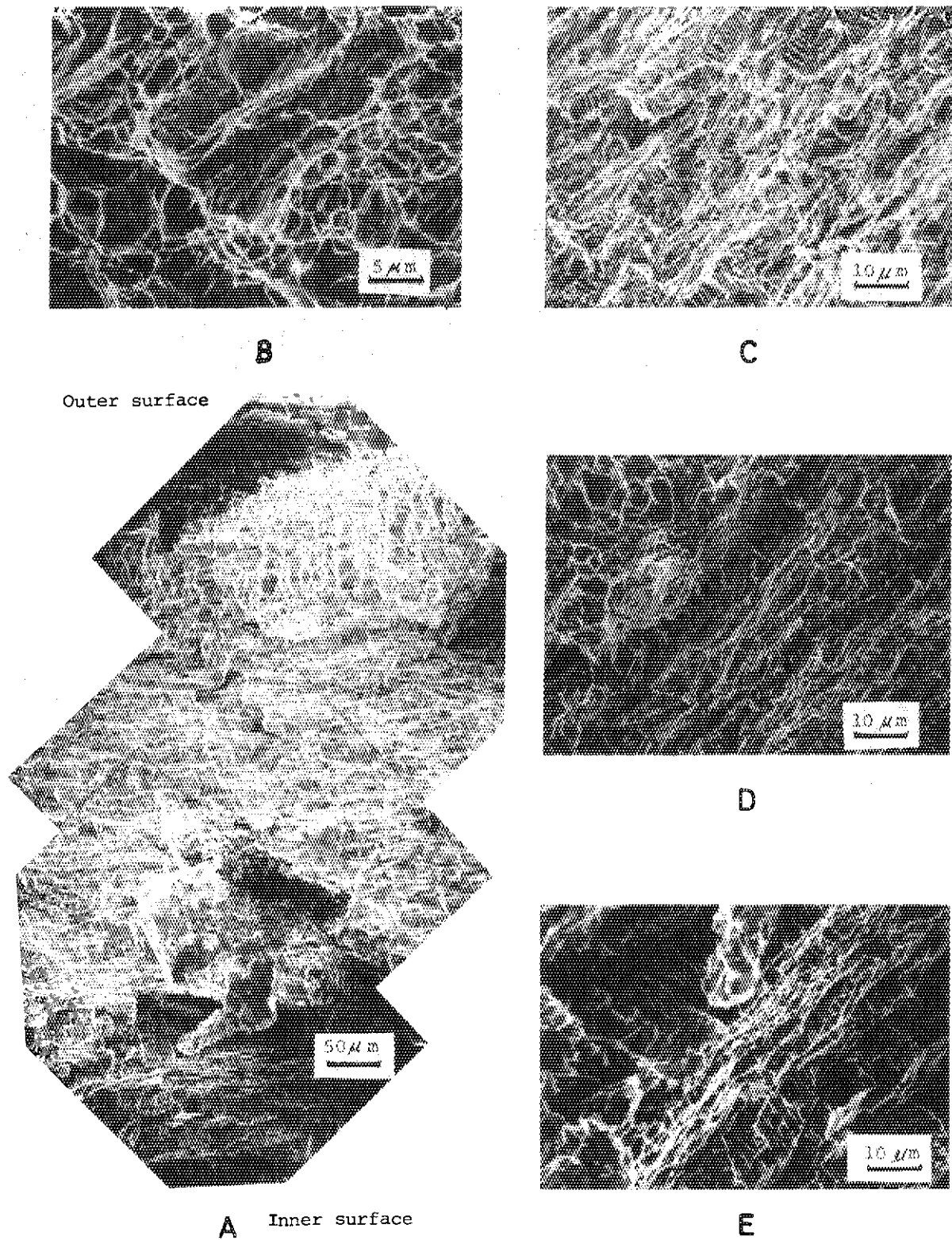
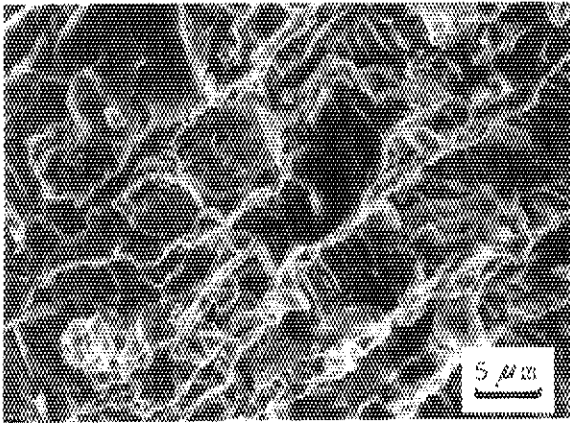
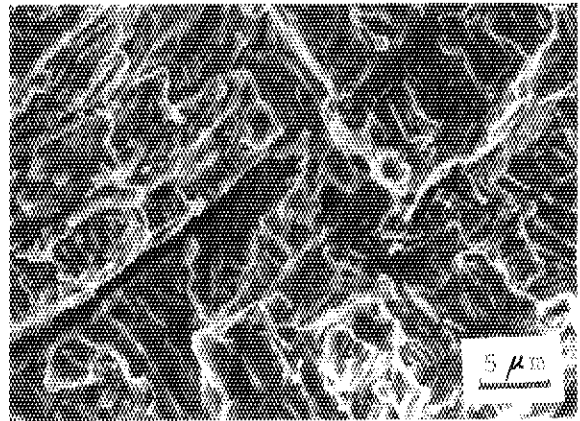


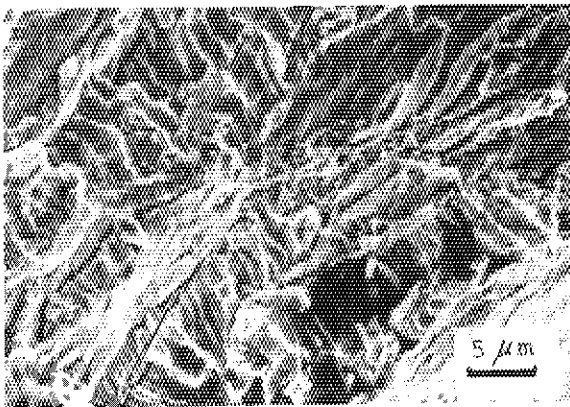
Fig. 16.2 SEM observation of cracked face in the test No.25 Magnified view



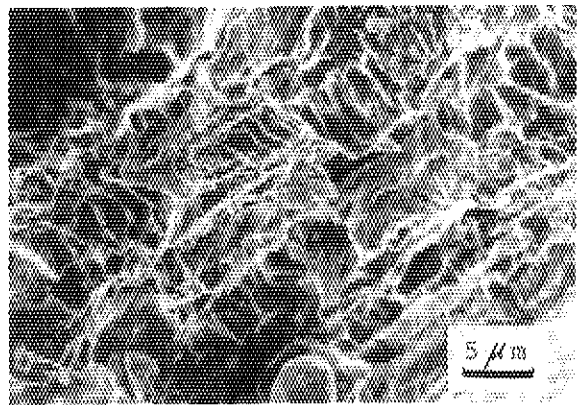
A



B



C



D

Fig. 16.3 SEM observation of cracked face in the test No.25..... Magnified view