

JAERI-M
83-001

ジルカロイ管内のクラック進展と
AEによる観察

1983年2月

菊地 章・中条 唯人*

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

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 日立高速印刷株式会社

ジルカロイ管内のクラック進展とAEによる観察

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

菊地 章・中条 唯人*

(1983年1月受理)

内面に初期クラックを入れたジルカロイ-2管試料を用いて、ヨウ素雰囲気下におけるクラック進展予備実験を行った。実験中、AE (Acoustic Emission) 装置により試料から発するAE信号を観察し、計数した。

試料には深い鮮明なXマークを伴うピンホール型破損を生じた。この破損に至るクラックは試料内を径方向と異なる方向に伝播し、かつ管長方向に分布していた。また、クラック破面のSEM観察では擬へき開の様相がみられた。

一方、実験中のAE信号は時間とともに変化する計数を示したが、この様相はクラック進展に対応するものと思われた。本実験によってAE法がクラック進展の動的挙動を追跡するに適していることを推察した。しかしながら両者の相関を定量的に評価するにはさらに実験を必要とする。

* 株式会社明電舎 研究開発部

Crack Extension in Zircaloy Tube and AE Observation

Akira KIKUCHI and Tadato NAKAJOU*

Division of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 6, 1983)

Zircaloy-2 tube samples with initial cracks were heated under internal pressure condition containing iodine gas. During the experiments, AE (Acoustic Emission) signals coming from the sample were observed and counted.

A pin-hole failure with deep and clear X-mark was observed at one point on the outer face of a sample in spite of small deformation. The crack inducing the failure was propagating to non-radial direction and was distributing against tube length. SEM observation of the failure face, however, indicated the appearance of quasi-cleavage.

On the other side, AE signals varied their counting during tests, which seemed to correspond to crack propagation. From the present works, it is supposed that AE procedure is useful for pursuing the dynamic behavior of crack extension, though the further experiments might be performed for comparing both behaviors quantitatively.

Keywords: Zircaloy-2, Crack Extension, Acoustic Emission
Iodine Gas, Tube Sample

* MEIDENSHA Electric Mfg. Co. Ltd.

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
2.3 実験法	2
3. 実験結果	2
3.1 ピンホールを伴う X マーク	2
3.2 X マーク近辺のクラックの様相	3
3.3 破断面の SEM 観察	3
3.4 実験中の AE 信号の変化	3
3.5 同類実験における AE の挙動	4
4. 検討および今後の課題	4
5. 結 言	5
謝 辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
2.1 Sample	1
2.2 Apparatus	1
2.3 Procedure	2
3. Results	2
3.1 X mark with pin-hole	2
3.2 Crack aspect near X mark position	3
3.3 SEM observation of cracked face	3
3.4 Change of AE signal during experiment	3
3.5 AE behavior in similar experiments	4
4. Discussion and Future Subjects	4
5. Conclusion	5
Acknowledgement	6
References	6

1. 序 言

軽水炉燃料の出力急昇時に生じ得る PCI/SCC (ペレット・被覆相互作用/応力腐食割れ) 破損現象は燃料安全性上のひとつの課題である。現象の把握, メカニズムの解明および破損対策の1連の研究が, 現在, 照射試験あるいは炉外実験によって実施されている。

被覆管の破損とは, 被覆管の内面に発生したクラックの管内貫通を意味している。従って, 破損に至るクラックの動的進展を明確にすることが, 破損条件 (応力, 温度, 環境など) に相まって, 破損メカニズムの確立に結びつくことになる。

クラックの動的挙動を求める方法として, 最近, A E 法 (Acoustic Emission) が広い分野で応用され始めている⁽¹⁾。この方法はクラックの進展の段階で発せられる音響波を増巾して検出し, 計数するもので, クラックのみにかかわらず, たとえば材料に生じる内部の局所的変形なども検出することも可能である。またジルカロイ材の基礎実験にもいく例が利用されている^{(2),(3)}。

現在, ジルカロイ-2被覆管の SCC に関する1連の炉外実験を実施しているが, このための実験装置に A E 測定装置を付属させ, クラックの動的進展を試験的に求めた。この実験では, いわゆる典型的 SCC 破損をみるには至らなかったが, X マークを伴うピンホール破損が試料に生じ, かつクラックの進展過程を間接的に示す A E 信号の変化を知ることができた。

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 (JPDR の JP-2 型) で, 表面にはオートクレーブ処理により数ミクロンのジルコニウム酸化膜が形成されている。試料は外径 12.23 mm, 肉厚 0.76 mm で, 長さは約 200 mm の寸法を持っている。

試料の内面には, クラック進展を容易にするため, 円周方向約 90 度毎に 4 ケ所, その全長にわたって 4 本の V 型初期クラックを設けた。初期クラックの平均深さは試料肉厚の約 20% である。

2.2 実験装置

実験は SCC 装置 (CL-SCC No. 1) および A E 装置を組合わせて行った。実験装置の構成を Fig. 1 に示す。

装置 CL-SCC No. 1 は, 本来, 軽水炉の負荷追従運転時に予想される燃料被覆管の状態を炉外で模擬するように設計, 製作されている。試料の上, 下端はスウェーჯロックで固定され, そ

1. 序 言

軽水炉燃料の出力急昇時に生じ得る PCI/SCC (ペレット・被覆相互作用/応力腐食割れ) 破損現象は燃料安全性上のひとつの課題である。現象の把握, メカニズムの解明および破損対策の1連の研究が, 現在, 照射試験あるいは炉外実験によって実施されている。

被覆管の破損とは, 被覆管の内面に発生したクラックの管内貫通を意味している。従って, 破損に至るクラックの動的進展を明確にすることが, 破損条件 (応力, 温度, 環境など) に相まって, 破損メカニズムの確立に結びつくことになる。

クラックの動的挙動を求める方法として, 最近, AE法 (Acoustic Emission) が広い分野で応用され始めている⁽¹⁾。この方法はクラックの進展の段階で発せられる音響波を増巾して検出し, 計数するもので, クラックのみにかかわらず, たとえば材料に生じる内部の局所的変形なども検出することも可能である。またジルカロイ材の基礎実験にもいく例が利用されている^{(2),(3)}。

現在, ジルカロイ-2被覆管のSCCに関する1連の炉外実験を実施しているが, このための実験装置にAE測定装置を付属させ, クラックの動的進展を試験的に求めた。この実験では, いわゆる典型的SCC破損をみるには至らなかったが, Xマークを伴うピンホール破損が試料に生じ, かつクラックの進展過程を間接的に示すAE信号の変化を知ることができた。

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 (JPDRのJP-2型) で, 表面にはオートクレーブ処理により数ミクロンのジルコニウム酸化膜が形成されている。試料は外径12.23 mm, 肉厚0.76 mmで, 長さは約200 mmの寸法を持っている。

試料の内面には, クラック進展を容易にするため, 円周方向約90度毎に4ヶ所, その全長にわたって4本のV型初期クラックを設けた。初期クラックの平均深さは試料肉厚の約20%である。

2.2 実験装置

実験はSCC装置 (CL-SCC No.1) およびAE装置を組合わせて行った。実験装置の構成をFig.1に示す。

装置CL-SCC No.1は, 本来, 軽水炉の負荷追従運転時に予想される燃料被覆管の状態を炉外で模擬するように設計, 製作されている。試料の上, 下端はスウェージロックで固定され, そ

の内部は圧力供給系よりのアルゴンガスにより最大約 50 MPa まで加圧（サイクリック加圧を含む）され得る。ジルカロイ管試料は直接通電によって任意の温度に保持される。本実験では SCC を生じさせるため、管内部に配置した容器（MACOR-石原薬品 K・K 製）内にあらかじめ固体ヨウ素粒を封入した。また試料の中央部には径変化をみるために変位測定センサー（差動トランス方式）を接触させている。さらに 2 対の CA 熱電対により試料温度が測定、制御される。

一方、試料中央部の 1 ケ所には試作治具により AE 信号検出用導波棒を軽い力で接触させた。使用した AE 装置は NF 回路設計ブロック社製のもので、Fig. 1 の構成図に示したように、AE 検出器、前置増巾器、主増巾器、計数器、オツシロスコープおよび記録計より成る。実験に用いた AE 検出器（単端型、PZT 素子使用、共振周波数 140 KHz）はその使用温度に限界（約 50 度 C）があるため、試作治具自体の水冷により昇温を防止している。主増巾器にはディスクリミネーターが含まれており、これによって計数すべき AE 信号を選択することができる。なおオツシロスコープは真の AE 信号と雑音信号とを識別するために使用される。

2.3 実験法

試料内の容器に約 2 グラムのヨウ素粒を入れ、試料を装置に組み込んだ。ヨウ素は約 180 度 C 以上の温度で気化するが、試料内空間容積は約 8 cc であり、従ってヨウ素ガス濃度は 0.25 g/cc 程度になるものと思われる。

約 15 MPa にアルゴンガスを加圧し、試料を直接通電によって 350°C まで昇温した。試料内圧は体積膨脹によって加圧され、最終内圧は 41 MPa に達した。

実験をとおして AE 信号、試料温度、試料内圧力および変位変化など全てのデータをひとつの記録計に集録した。これはデータ相互の関連を調べるためである。

定常状態（温度 350 度 C、内圧 41 MPa）到達後、約 40 分の時に、極端な AE 計数率の増大と共に内圧が急激に低下した。これは被覆管試料に破損を生じたことを示している。

3. 実験結果

3.1 ピンホールを伴う X マーク

加圧・加熱実験終了後試料の外観をみたところ、Photo. 1 に示すようなピンホールを伴った X マークが観察された。位置は試料の長さ方向中央部で、試料内面に設けた 4 本の初期クラックの内の 1 本に対応しており、少しずれたところであった。

ピンホールは肉眼では判らぬ程度の孔径である。X マークはかなり凹凸があり、非常に輪郭のはっきりした様相を呈している。X マークの巾は約 1 mm、長さは約 8 mm 程度である。

の内部は圧力供給系よりのアルゴンガスにより最大約 50 MPa まで加圧（サイクリック加圧を含む）され得る。ジルカロイ管試料は直接通電によって任意の温度に保持される。本実験では SCC を生じさせるため、管内部に配置した容器（MACOR-石原薬品 K・K 製）内にあらかじめ固体ヨウ素粒を封入した。また試料の中央部には径変化をみるために変位測定センサー（差動トランス方式）を接触させている。さらに 2 対の CA 熱電対により試料温度が測定、制御される。

一方、試料中央部の 1 ケ所には試作治具により AE 信号検出用導波棒を軽い力で接触させた。使用した AE 装置は NF 回路設計ブロック社製のもので、Fig. 1 の構成図に示したように、AE 検出器、前置増巾器、主増巾器、計数器、オツシロスコープおよび記録計より成る。実験に用いた AE 検出器（単端型、PZT 素子使用、共振周波数 140 KHz）はその使用温度に限界（約 50 度 C）があるため、試作治具自体の水冷により昇温を防止している。主増巾器にはディスクリミネーターが含まれており、これによって計数すべき AE 信号を選択することができる。なおオツシロスコープは真の AE 信号と雑音信号とを識別するために使用される。

2.3 実験法

試料内の容器に約 2 グラムのヨウ素粒を入れ、試料を装置に組み込んだ。ヨウ素は約 180 度 C 以上の温度で気化するが、試料内空間容積は約 8 cc であり、従ってヨウ素ガス濃度は 0.25 g/cc 程度になるものと思われる。

約 15 MPa にアルゴンガスを加圧し、試料を直接通電によって 350°C まで昇温した。試料内圧は体積膨脹によって加圧され、最終内圧は 41 MPa に達した。

実験をとおして AE 信号、試料温度、試料内圧力および変位変化など全てのデータをひとつの記録計に集録した。これはデータ相互の関連を調べるためである。

定常状態（温度 350 度 C、内圧 41 MPa）到達後、約 40 分の時に、極端な AE 計数率の増大と共に内圧が急激に低下した。これは被覆管試料に破損を生じたことを示している。

3. 実験結果

3.1 ピンホールを伴う X マーク

加圧・加熱実験終了後試料の外観をみたところ、Photo. 1 に示すようなピンホールを伴った X マークが観察された。位置は試料の長さ方向中央部で、試料内面に設けた 4 本の初期クラックの内の 1 本に対応しており、少しずれたところであった。

ピンホールは肉眼では判らぬ程度の孔径である。X マークはかなり凹凸があり、非常に輪郭のはっきりした様相を呈している。X マークの中は約 1 mm、長さは約 8 mm 程度である。

3.2 Xマーク近辺のクラックの様相

Xマーク交点より約0.5 mmおよび約5 mm離れた試料断面について、被覆管内部のクラックを観察した。これらの結果をPhoto.2に示す。

Photo.2(A)はXマーク交点直下の写真であるが、これにみられるように、クラックは初期クラックからの径方向に対し斜めの方向に伝播している。Xマークの交点で貫通するが、0.5 mmの位置ではこのように未貫通である。約5 mm離れた断面におけるPhoto.2(B)では、このクラック(PC)の長さがさらに短くなっている。さらにこの位置では反対方向に伝播する他のクラック(NPC)がみられる。ピンホールを伴うXマークは試料の1ヶ所にもみ観察されているのでこのクラック(NPC)は未貫通のものと思われる。

この実験で得られたクラックの立体的な様相はPhoto.2(およびPhoto.1)から推察される。これを模図してFig.2に示す。クラックは試料の長さ方向に分布しており、さらに径方向よりずれて進展し、その先端部をピンホールとしてXマークを形成している。

本報はひとつの実験試料に着目しているが、このほかにいくつかの同種実験を行っている。Fig.3はそれらからの結果を含めて写真より写し取ったクラックの様相を示したものである。図中、点線のクラックが他の実験からのもので、これら全体にみられるように、クラックの進展方向には系統性が存在している。

3.3 破断面のSEM観察

Xマーク部の1ヶ所のクラック部を試料の長さ方向に押し広げ(スプリット)、破断面をSEMにより観察した。この結果をPhoto.3に示す。上図は長さ方向の破面のマクロ写真であり、下の写真はAおよびB領域の拡大である。

マクロ写真に明らかな様にはほぼ中央に境界をもち、クラック面とスプリット面が分かれている。スプリット面には、ミクロ写真のように深いディンプルが見られ、これは典型的な延性破面を呈している。一方、クラック面にはこの様なディンプルは見られず、擬へき開破面的な様相を示している。しかしながら、いわゆるSCC破面(へき開とフルーティングの混在)ではない。金相によるクラックの進展状態およびSEMによる破面観察の結果、本実験で得たクラックはある特殊なものと考えられる。

3.4 実験中のAE信号の変化

実験中に得たAE信写はオシロスコープによってその波形を点検した。試料のクラック進展らによって検出されたAE波形を模写してFig.4に示す。信号は速い立ち上がりで最大振幅に達し、その後減衰している。この波はひとつの事象を示すものであるが、AE信号の計数は図のように設定したディスクリミネーター・レベルより大きいパルス全体を表示する。いずれにしろ大きい計数値は多事象かあるいは大振幅の1事象に対応するが、AE信号の頻度(オシロスコープ観察)からして後者が適応していると思われる。

実験中、A E計数としては時間10秒毎の計数率（対数計数率）および全計数を測定している。Fig. 5にこれらを示す。実験がほぼ定常に達した時点より全計数が増大し、計数率には増減の様相がみられた。約40分の後（図に示していないが）A E計数率および全計数が極端に増大した。これはピンホール破損によるガス流出のため試料に振動が生じたためと推察される。

3.5 同類実験におけるA Eの挙動

本報告の扱っているひとつの実験のほか、同類のいくつかの実験も既に終了している。本節ではこれらの実験で得られたA Eの挙動をまとめて紹介する。

これらの実験では試料に長さ方向の割れを生じ、高圧アルゴンガスの吹出しによってさらに開口している。1例をPhoto. 4に示す。破損直前までの試料の変位は少なく、従ってこれら試料の破損が前節までに述べたピンホール破損状態を瞬時に超過したことによると推察できる。Fig. 3のクラック進展方向の同一性から判断してもこれら同類実験の試料破損形態は全く同一と思われる。

同類4実験（No. 8, No. 13, No. 15およびNo. 17）における実験中のA E挙動、温度および内圧条件をFig. 6～9に、またFig. 5をこれらの図の型式で書き替えてFig. 10に示す。

4. 検討および今後の課題

本実験における当初の目的は、試料にS C C破損を生じさせ、A E挙動を把握することであった。典型的なS C Cによるクラックの進展方向は管の径方向であり、その行路もジグザグ状が一般的である。また破面も特有の様相（へき開とフルーティングの混在）を示すものである。しかしながら本実験では前章に示したように、完全なS C Cではなさそうである。

実験で得られた諸データの特色をまとめて列挙し、考察すると次のとおりである。

1) 深いXマークの存在

通常、Xマークは延性変形の結果生じるものとされている。たとえば被覆管のS C Cとして管外面近辺まで到達したクラックは、以降、不安定塑性変形を生じ、瞬時に外面にまで貫通するが、この時、浅いXマークが往々にして観察される。本実験における深いXマークの存在は、比較的大きな塑性変形が生じたことに対応しよう。しかしながら外観的にはそれ程の変位は生じていない。

2) クラックの進展挙動

クラックは径方向に対して約66度の方向に進展し、場合によっては逆の方向に転換する場合もある（Fig. 3参照）。一般にこの向きに進むクラックはせん断延性クラックであるとされている。

3) S E Mの示す破面の様相

径方向と異なる向きに進展するクラック面は、比較的平らな擬へき開の様相を示している。クラックの停止以降の面のスプリットで得た面が典型的な深いディンプルで形成されてい

実験中、A E計数としては時間10秒毎の計数率（対数計数率）および全計数を測定している。Fig. 5にこれらを示す。実験がほぼ定常に達した時点より全計数が増大し、計数率には増減の様相がみられた。約40分の後（図に示していないが）A E計数率および全計数が極端に増大した。これはピンホール破損によるガス流出のため試料に振動が生じたためと推察される。

3.5 同類実験におけるA Eの挙動

本報告の扱っているひとつの実験のほか、同類のいくつかの実験も既に終了している。本節ではこれらの実験で得られたA Eの挙動をまとめて紹介する。

これらの実験では試料に長さ方向の割れを生じ、高圧アルゴンガスの吹出しによってさらに開口している。1例をPhoto.4に示す。破損直前までの試料の変位は少なく、従ってこれら試料の破損が前節までに述べたピンホール破損状態を瞬時に超過したことによると推察できる。Fig. 3のクラック進展方向の同一性から判断してもこれら同類実験の試料破損形態は全く同一と思われる。

同類4実験（No. 8, No. 13, No. 15およびNo. 17）における実験中のA E挙動、温度および内圧条件をFig. 6～9に、またFig. 5をこれらの図の型式で書き替えてFig. 10に示す。

4. 検討および今後の課題

本実験における当初の目的は、試料にS C C破損を生じさせ、A E挙動を把握することであった。典型的なS C Cによるクラックの進展方向は管の径方向であり、その行路もジグザグ状が一般的である。また破面も特有の様相（へき開とフルーティングの混在）を示すものである。しかしながら本実験では前章に示したように、完全なS C Cではなさそうである。

実験で得られた諸データの特徴をまとめて列挙し、考察すると次のとおりである。

1) 深いXマークの存在

通常、Xマークは延性変形の結果生じるものとされている。たとえば被覆管のS C Cとして管外面近辺まで到達したクラックは、以降、不安定塑性変形を生じ、瞬時に外面にまで貫通するが、この時、浅いXマークが往々にして観察される。本実験における深いXマークの存在は、比較的大きな塑性変形が生じたことに対応しよう。しかしながら外観的にはそれ程の変位は生じていない。

2) クラックの進展挙動

クラックは径方向に対して約66度の方向に進展し、場合によっては逆の方向に転換する場合もある（Fig. 3参照）。一般にこの向きに進むクラックはせん断延性クラックであるとされている。

3) S E Mの示す破面の様相

径方向と異なる向きに進展するクラック面は、比較的平らな擬へき開の様相を示している。クラックの停止以降の面のスプリットで得た面が典型的な深いディンプルで形成されてい

ることと対比するとSEM観察の結果は多分に脆性破壊の様相を呈している。

以上のことを総括すると本実験で生じたクラックが延性なのか脆性なのか不明になる。この破損形態を求めることは今後の課題である。しかし、いずれの形態であれ実験雰囲気として加えたヨウ素が何等かの作用をしていることは確かである。これは、ヨウ素を除いた同実験条件で実施した試験で確認された。破損条件に存在したにもかかわらず何等の破損も（その傾向すら）生じず、さらにAE信号も検知されなかった。

破損形態の断定には至らぬものの、AE信号には明らかにクラックの進展過程を表わしているとみられる変化が測定されている（Fig.6～Fig.10参照）。AE計数率は時により増大し、また減少しており、頻度が激しくなった後破損が生じている。このように定性的にはAE装置がクラックの動的進展を追っていると思われるが、定量解析をするにはデータが不足している。

破損形態として延性破壊を仮想すると、Fig.11に示す菊池⁽⁴⁾のモデルに興味がみられる。ある状態においてクラック先端の析出物が核となってボイドが形成され、その時に弱いAE信号が生じ、これらのボイドがクラックと合体する時に強いAE信号がでる。このモデルが本実験のAE挙動に適用されるならば、強弱のAE信号が交互に検出されることになる。その例を我々はFig.5にみることもできる。さらにクラック先端部にはPhoto.5にみられるようなボイドの鎖もみられ、モデルの適用が一応可能とも思われる。しかしながらこのことの確認も今後の詳細な追試を待たねばならない。

5. 結 言

内面の長さ方向で円周4ヶ所に肉厚深さ約20%のV型初期クラックを入れたジルカロイ-2管を試料として、内部加圧による破損実験を行った。実験条件は温度約350℃、内圧約40MPa、かつ約0.2g/cm³のヨウ素雰囲気である。実験中、試料中央部に接したAEセンサーをとおして、クラック進展に伴って発せられるAE信号を検出、計数した。

試料にはピンホールを伴う深い明白なXマークが管中央部にみられた。ピンホールは外観の1点であり、管内部では約8mmにわたって管の長さ方向に分布するクラックであることを認めた。さらにこのクラックは管の径方向に対して斜めに進展していることが判った。ピンホール形成段階を越えると管外面において管の長さ方向に割れるが、現象的には同じクラック進展形態を示している。

クラック面のSEM（走査型電顕）観察によると、破面に延性としてのディンプルはみられず、擬へき開の様相を呈していた。一方、スプリット破面は深いディンプルで構成されている。一般にXマークは延性変形によって形成されるとみられるが、変位的にはそれ程の変形はなく、SEM観察の結果（半脆性）と矛盾するようにも思えるが、これらの詳細な探究は未だ実施していない。

いずれにしろ実験で得た試料破損には、初期的に封入したヨウ素が関連していることは確実である。同一実験条件かつヨウ素未封入で行った実験では、試料に破損を生じないことを確認している。

ることと対比するとSEM観察の結果は多分に脆性破壊の様相を呈している。

以上のことを総括すると本実験で生じたクラックが延性なのか脆性なのか不明になる。この破損形態を求めることは今後の課題である。しかし、いずれの形態であれ実験雰囲気として加えたヨウ素が何等かの作用をしていることは確かである。これは、ヨウ素を除いた同実験条件で実施した試験で確認された。破損条件に存在したにもかかわらず何等の破損も（その傾向すら）生じず、さらにAE信号も検知されなかった。

破損形態の断定には至らぬものの、AE信号には明らかにクラックの進展過程を表わしているとみられる変化が測定されている（Fig.6～Fig.10参照）。AE計数率は時により増大し、また減少しており、頻度が激しくなった後破損が生じている。このように定性的にはAE装置がクラックの動的進展を追っていると思われるが、定量解析をするにはデータが不足している。

破損形態として延性破壊を仮想すると、Fig.11に示す菊池⁽⁴⁾のモデルに興味がみられる。ある状態においてクラック先端の析出物が核となってボイドが形成され、その時に弱いAE信号が生じ、これらのボイドがクラックと合体する時に強いAE信号がでる。このモデルが本実験のAE挙動に適用されるならば、強弱のAE信号が交互に検出されることになる。その例を我々はFig.5にみることもできる。さらにクラック先端部にはPhoto.5にみられるようなボイドの鎖もみられ、モデルの適用が一応可能とも思われる。しかしながらこのことの確認も今後の詳細な追試を待たねばならない。

5. 結 言

内面の長さ方向で円周4ヶ所に肉厚深さ約20%のV型初期クラックを入れたジルカロイ-2管を試料として、内部加圧による破損実験を行った。実験条件は温度約350℃、内圧約40MPa、かつ約0.2g/cm³のヨウ素雰囲気である。実験中、試料中央部に接したAEセンサーをとおして、クラック進展に伴って発せられるAE信号を検出、計数した。

試料にはピンホールを伴う深い明白なXマークが管中央部にみられた。ピンホールは外観の1点であり、管内部では約8mmにわたって管の長さ方向に分布するクラックであることを認めた。さらにこのクラックは管の径方向に対して斜めに進展していることが判った。ピンホール形成段階を越えると管外面において管の長さ方向に割れるが、現象的には同じクラック進展形態を示している。

クラック面のSEM（走査型電顕）観察によると、破面に延性としてのディンプルはみられず、擬へき開の様相を呈していた。一方、スプリット破面は深いディンプルで構成されている。一般にXマークは延性変形によって形成されるとみられるが、変位的にはそれ程の変形はなく、SEM観察の結果（半脆性）と矛盾するようにも思えるが、これらの詳細な探究は未だ実施していない。

いずれにしろ実験で得た試料破損には、初期的に封入したヨウ素が関連していることは確実である。同一実験条件かつヨウ素未封入で行った実験では、試料に破損を生じないことを確認している。

実験中のAE挙動（波形の観察および計数）として、クラックの進展に伴うAE信号の変化を観察し、計数することができた。これによってAE信号を将来より定性的かつ定量的に解釈し得ればクラック進展挙動追跡に大いに利用しうることを認めた。

現在、2チャンネル方式のAE法による次段階の実験を計画中である。

謝 辞

本実験を行うあたり、原研安全工学部燃料安全第一研究室の室員諸氏ならびに材料試験炉部照射一課の課員諸氏の御協力・御指導を得た。こゝに深く謝意を表したい。特に藤田、瀬崎および石井諸氏には、実験実施に必要な諸治具等の準備の面で多大の御協力を得た。

参考文献

- (1) アコースティック・エミッションの基礎と応用，尾上守夫ほか共著，コロナ社
- (2) B. Cox, "Environmentally Induced Cracking of Zirconium Alloys", CORROSION-NACE Vol. 28, No. 6, June, 1972
- (3) B. Cox, "A Correlation Between Acoustic Emission During SCC and Fractography of Cracking of the Zircalloys", CORROSION-NACE Vol. 30, No. 6, June, 1974
- (4) 菊池, "固体材料の破壊過程とそれに伴う音波放出に関する破壊力学的研究", 昭和55年, 東北大学博士論文

〔AE基本に関する他の資料〕

- a) 社団法人，日本非破壊検査協会，アコースティックエミッション（AE）テキスト 基礎講座とトピックス
- b) 社団法人，日本非破壊検査協会，006特別研究委員会資料No.62, No.64, No.65その他
- c) 化学装置 1980年9月号，渡辺哲夫，" 材器開発と今後の動向，AE計測装置"

実験中のAE挙動（波形の観察および計数）として、クラックの進展に伴うAE信号の変化を観察し、計数することができた。これによってAE信号を将来より定性的かつ定量的に解釈し得ればクラック進展挙動追跡に大いに利用しうることを認めた。

現在、2チャンネル方式のAE法による次段階の実験を計画中である。

謝 辞

本実験を行うあたり、原研安全工学部燃料安全第一研究室の室員諸氏ならびに材料試験炉部照射一課の課員諸氏の御協力・御指導を得た。こゝに深く謝意を表したい。特に藤田、瀬崎および石井諸氏には、実験実施に必要な諸治具等の準備の面で多大の御協力を得た。

参考文献

- (1) アコースティック・エミッションの基礎と応用，尾上守夫ほか共著，コロナ社
- (2) B. Cox, "Environmentally Induced Cracking of Zirconium Alloys", CORROSION-NACE Vol. 28, No. 6, June, 1972
- (3) B. Cox, "A Correlation Between Acoustic Emission During SCC and Fractography of Cracking of the Zircalloys", CORROSION-NACE Vol. 30, No. 6, June, 1974
- (4) 菊池, "固体材料の破壊過程とそれに伴う音波放出に関する破壊力学的研究", 昭和55年, 東北大学博士論文

〔AE基本に関する他の資料〕

- a) 社団法人，日本非破壊検査協会，アコースティックエミッション（AE）テキスト 基礎講座とトピックス
- b) 社団法人，日本非破壊検査協会，006特別研究委員会資料No.62, No.64, No.65その他
- c) 化学装置 1980年9月号，渡辺哲夫，" 材器開発と今後の動向，AE計測装置"

実験中のAE挙動（波形の観察および計数）として、クラックの進展に伴うAE信号の変化を観察し、計数することができた。これによってAE信号を将来より定性的かつ定量的に解釈し得ればクラック進展挙動追跡に大いに利用しうることを認めた。

現在、2チャンネル方式のAE法による次段階の実験を計画中である。

謝 辞

本実験を行うあたり、原研安全工学部燃料安全第一研究室の室員諸氏ならびに材料試験炉部照射一課の課員諸氏の御協力・御指導を得た。こゝに深く謝意を表したい。特に藤田、瀬崎および石井諸氏には、実験実施に必要な諸治具等の準備の面で多大の御協力を得た。

参考文献

- (1) アコースティック・エミッションの基礎と応用，尾上守夫ほか共著，コロナ社
- (2) B. Cox, "Environmentally Induced Cracking of Zirconium Alloys", CORROSION-NACE Vol. 28, No. 6, June, 1972
- (3) B. Cox, "A Correlation Between Acoustic Emission During SCC and Fractography of Cracking of the Zircalloys", CORROSION-NACE Vol. 30, No. 6, June, 1974
- (4) 菊池, "固体材料の破壊過程とそれに伴う音波放出に関する破壊力学的研究", 昭和55年, 東北大学博士論文

〔AE基本に関する他の資料〕

- a) 社団法人，日本非破壊検査協会，アコースティックエミッション（AE）テキスト 基礎講座とトピックス
- b) 社団法人，日本非破壊検査協会，006特別研究委員会資料No.62, No.64, No.65その他
- c) 化学装置 1980年9月号，渡辺哲夫，" 材器開発と今後の動向，AE計測装置"

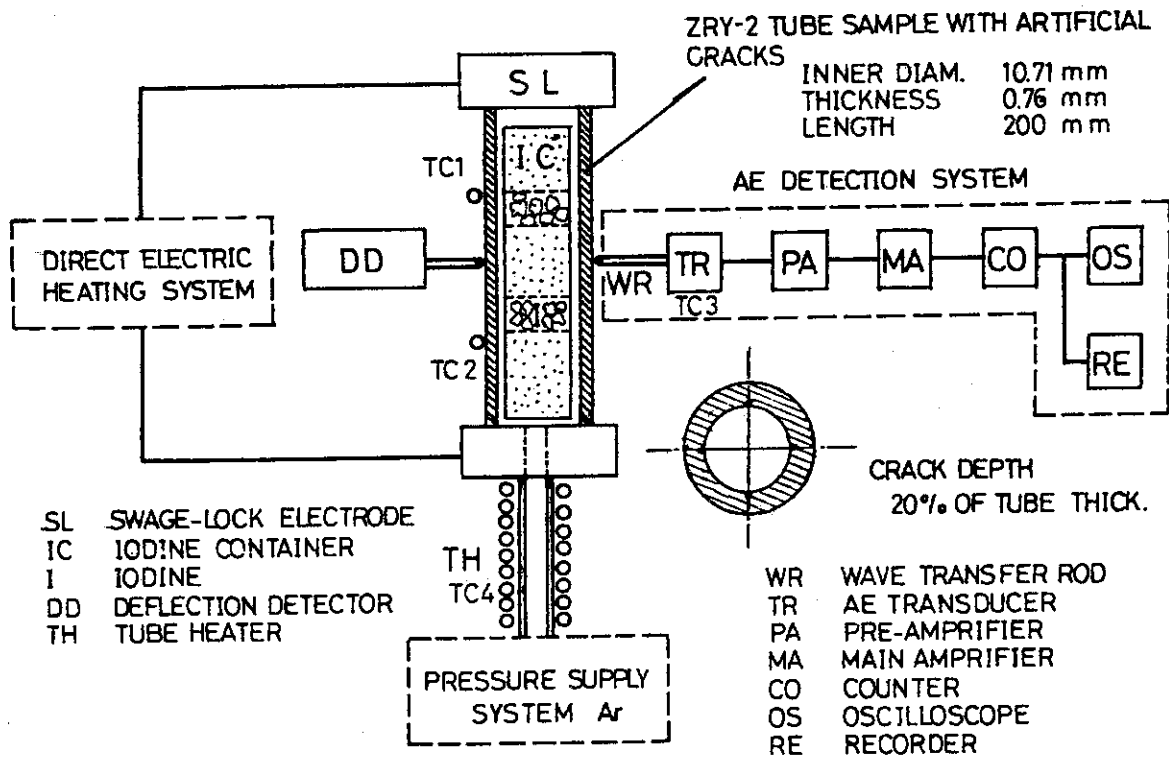


Fig. 1 Constitution of the experimental apparatus

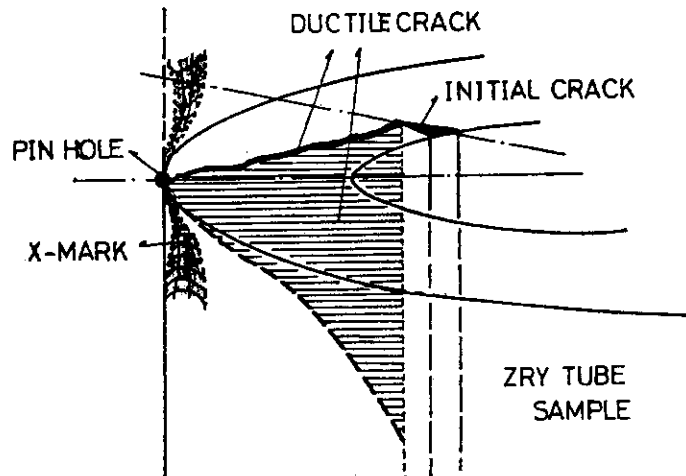


Fig. 2 Direction and distribution of the propagating crack

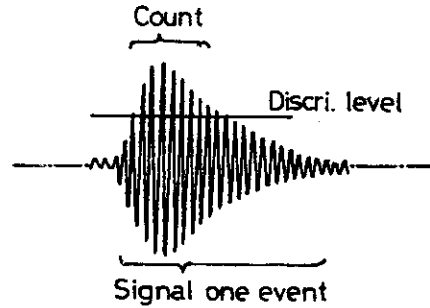
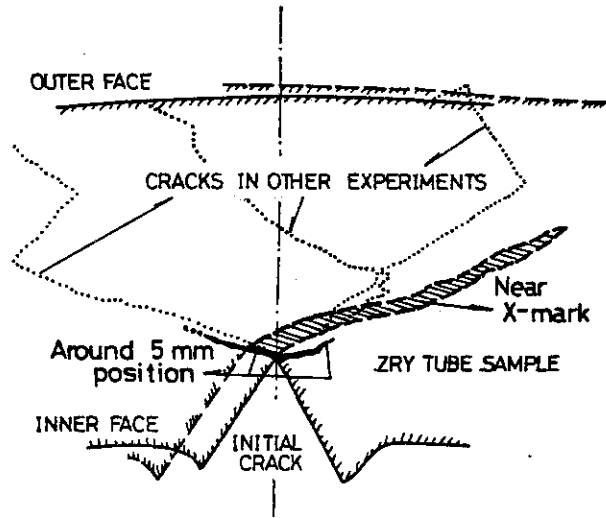


Fig. 3 Summary of crack behaviors including the other experimental results

Fig. 4 Illustration of AE signal observed

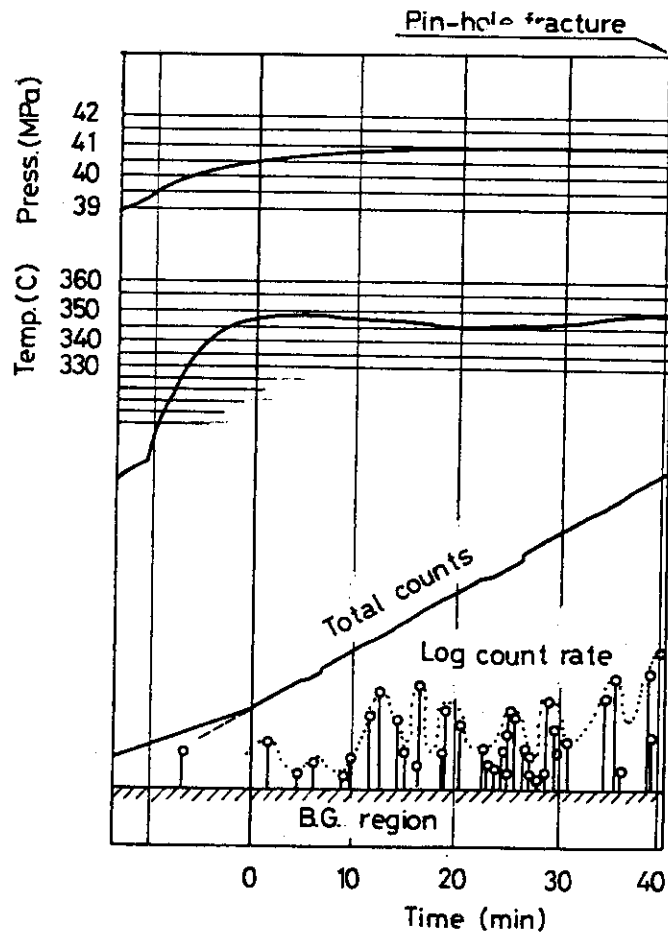


Fig. 5 Changes of total counts and log-count-rate in the experiment (NO. 20)

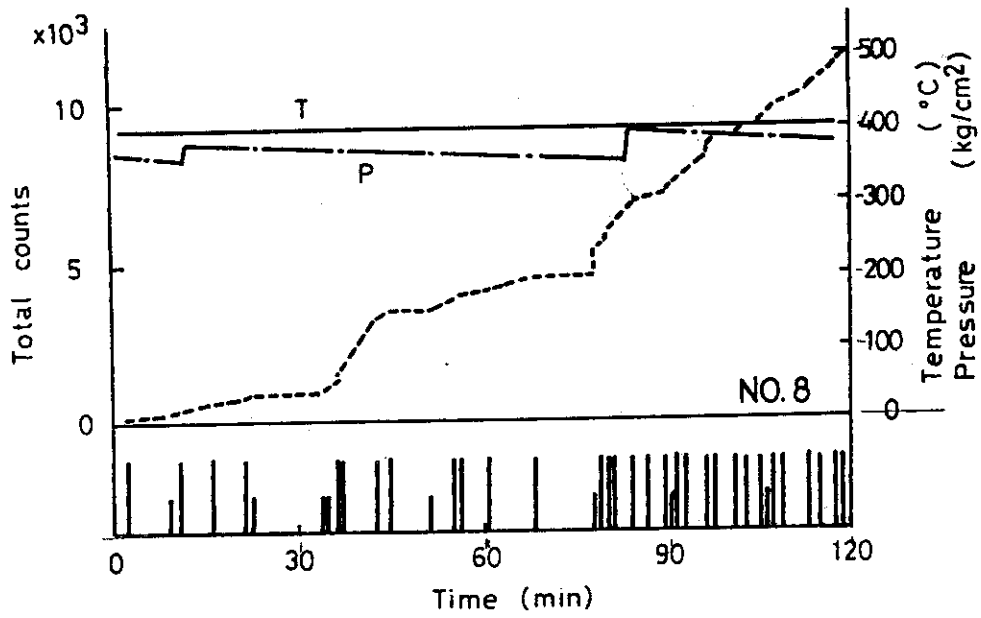


Fig. 6 AE behavior in the experiment NO. 8

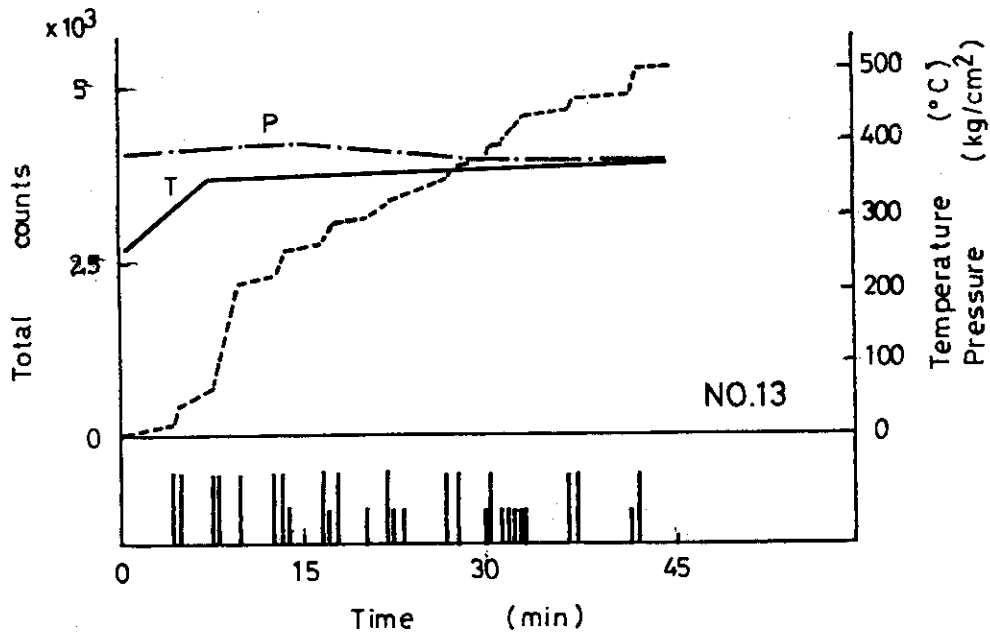


Fig. 7 AE behavior in the experiment No.13

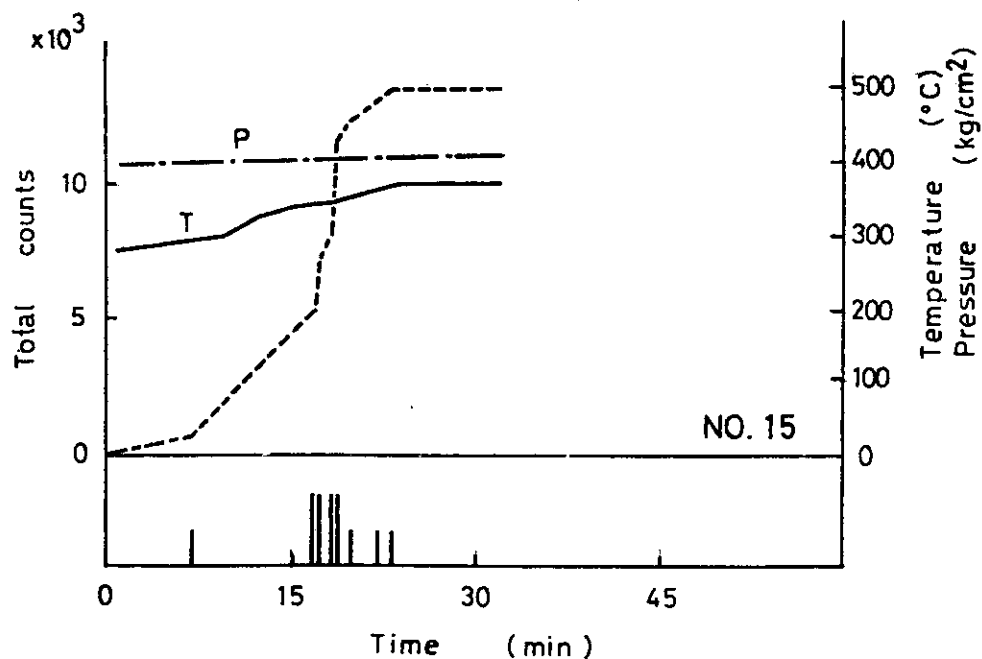


Fig. 8 AE behavior in the experiment No.15

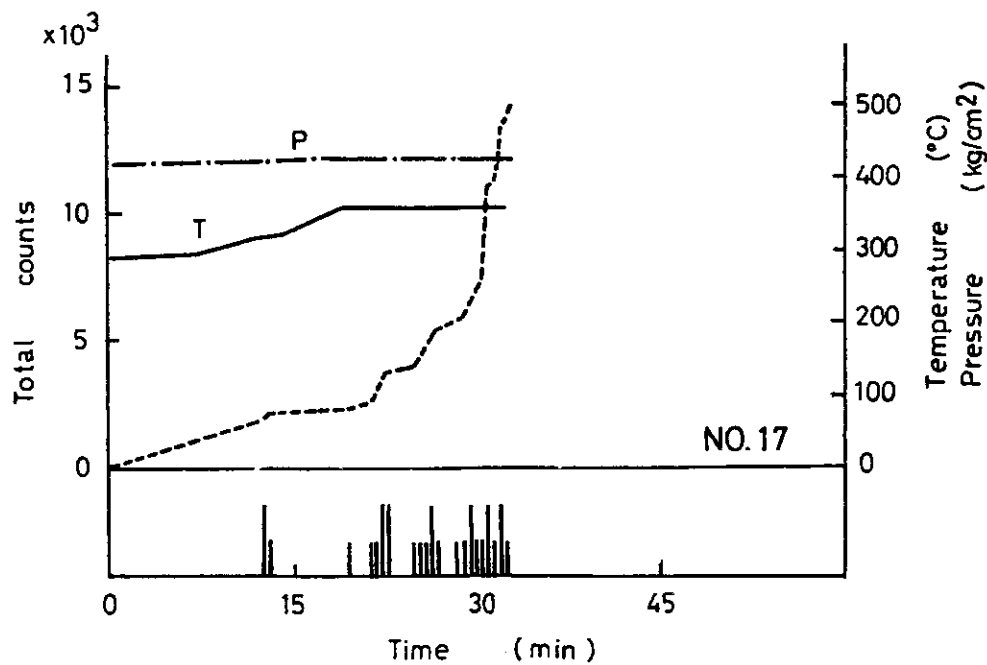


Fig. 9 AE behavior in the experiment No.17

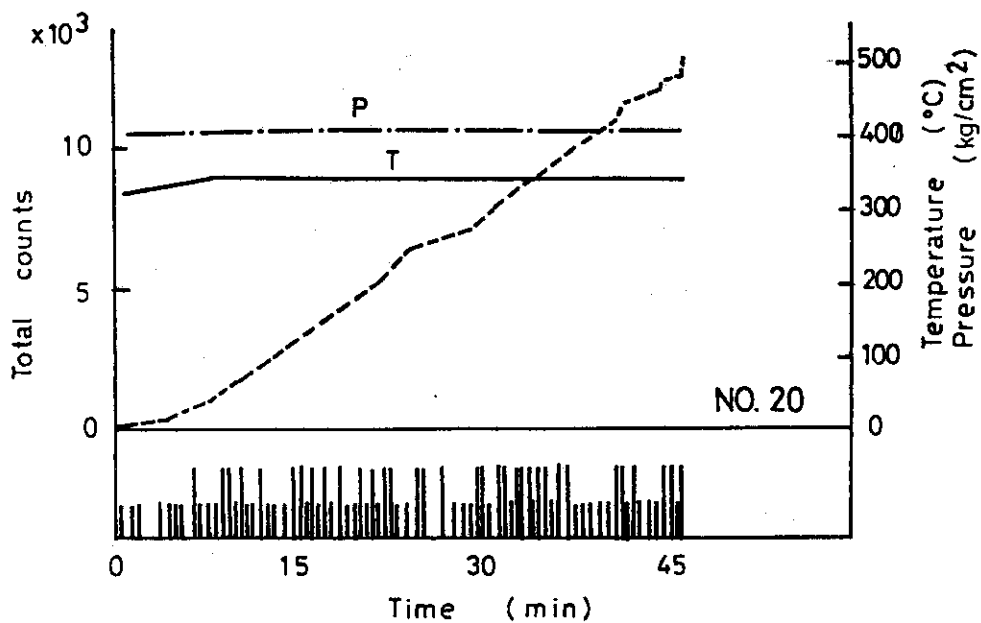


Fig. 10 AE behavior in the experiment No.20

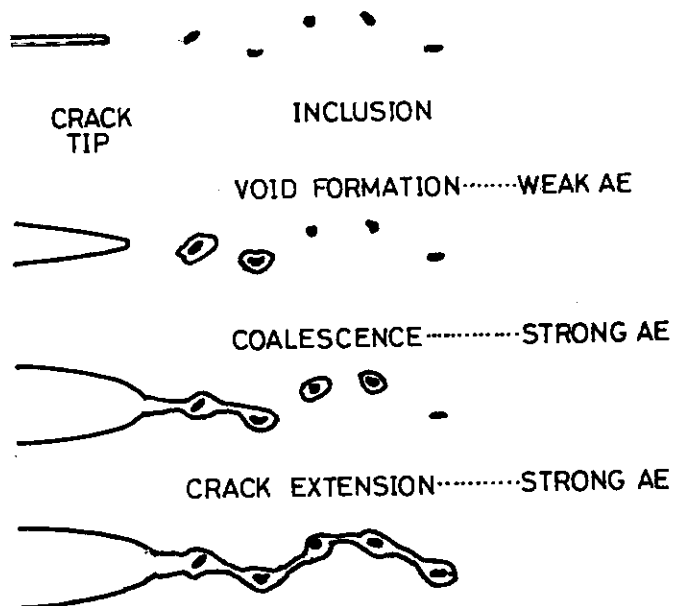


Fig. 11 A model expressing the relation between ductile fracture and AE signal (Ref. (4))

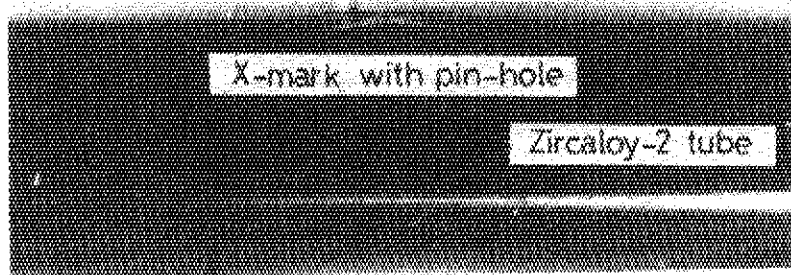
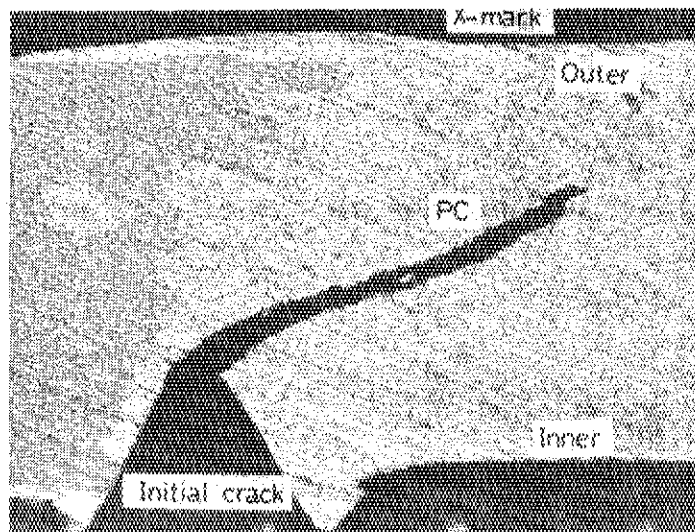
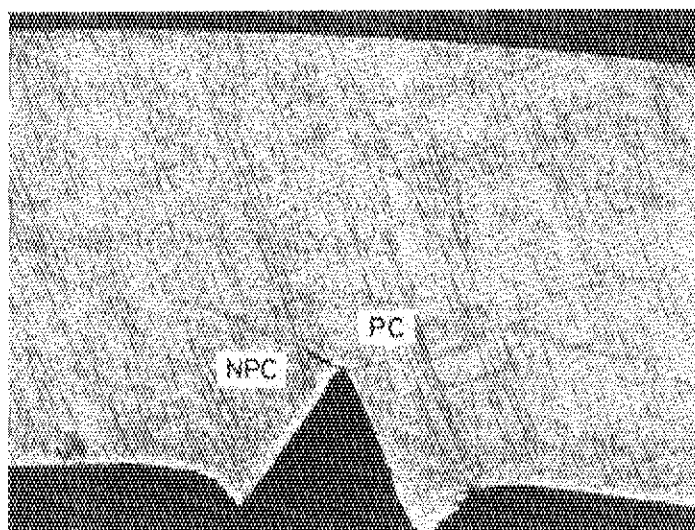


Photo. 1 X-mark with pin-hole observed in the sample (No.20)



2(A) Position 0.5 mm



2(B) Position 5 mm

Photo. 2 Aspects of cracks near X-mark positions
(PC : Penetrated crack ; NPC : Non-penetrated crack)

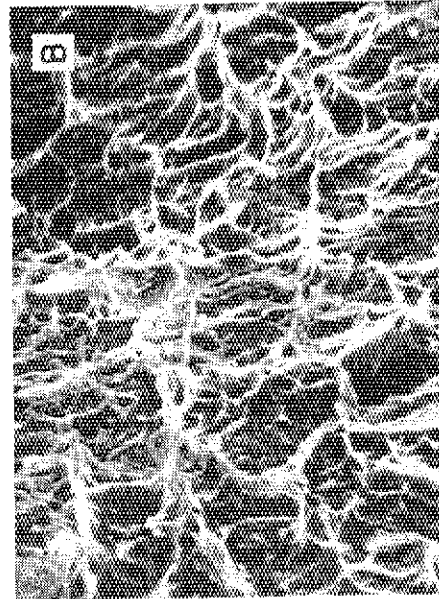
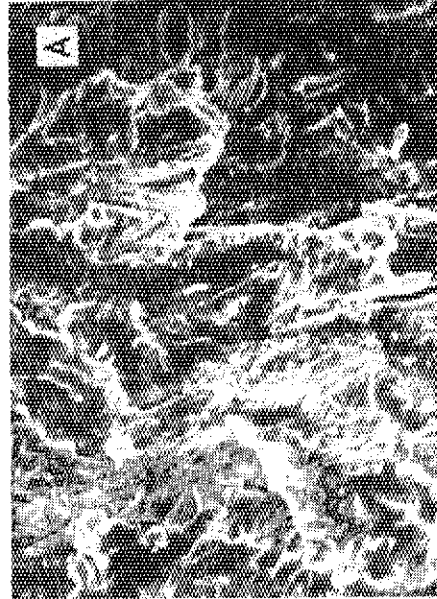
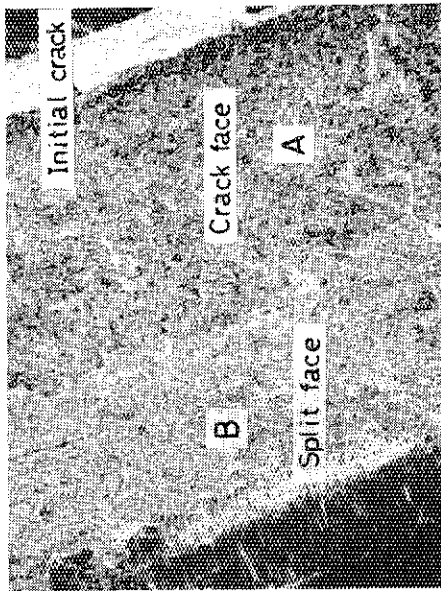


Photo. 3 SEM observation of the crack face after splitting

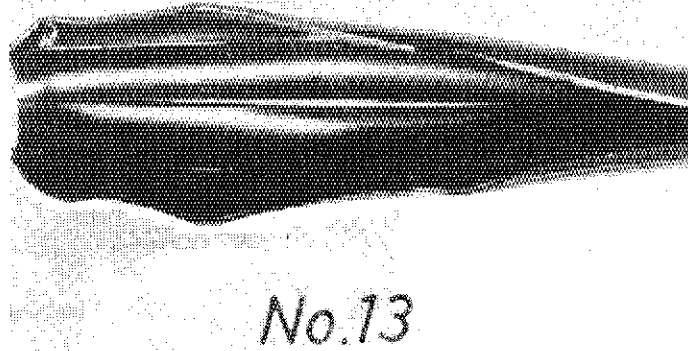


Photo. 4 Failure observed in the experiment No.13

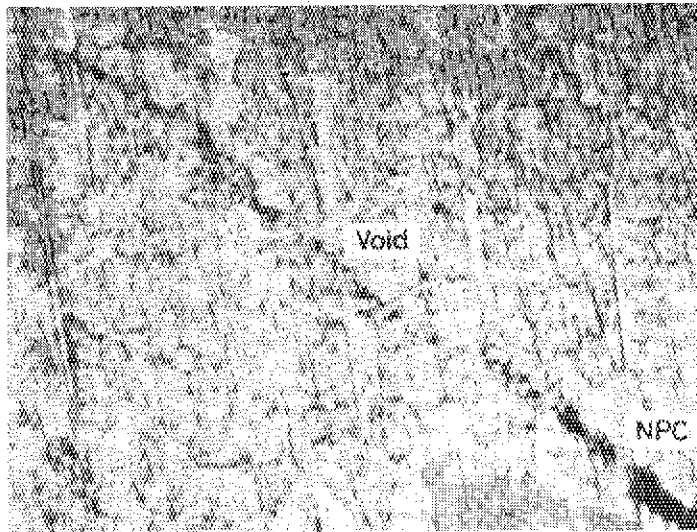


Photo. 5 Void distribution near crack tip in the sample (No.20)