

JAERI-M
83-036

PCI破損におけるクラック進展挙動の
予備解析

1983年2月

菊 地 章

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。
入手の問い合わせは、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、お申しこしてください。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 山田軽印刷所

PCI 破損におけるクラック進展挙動の予備解析

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

菊地 章

(1983年1月31日受理)

軽水炉用燃料の出力急昇時に生じ得る PCI/SCC 破損研究において、被覆管内面に発したクラックの進展挙動を知ることが基本的に必要である。破損時間に関する炉内照射データおよび炉外実験データを参照し、クラック進展速度の計算を試みた。速度計算には EPRI モデルを採用し、かつ応力などの計算には計算コード FEMAXI-III を使用した。さらに EPRI モデルのパラメータサーベイを行い、モデルの特性を調べた。以上の結果、破損についてのデータの検証において EPRI モデルがヨウ素濃度に大きく依存することが判った。総括的にみて照射および炉外実験データとの検証は計算値および実験値に比較的よい一致を示しており、ヨウ素濃度の効果を考えるとモデルの適用妥当性をみることができる。

Preliminary Analyses of Crack Extension Behavior in PCI Failure

Akira KIKUCHI

Division of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1983)

It is fundamentally necessary to investigate crack extension behavior with the progresss of the studies on PCI/SCC failure of a LWR fuel. On the bases of irradiation and outpile data on failure time, the crack lengths propagating through cladding tube samples were estimated using the EPRI model and the code FEMAXI-III. Furthermore, the effects of the parameters such as stress, temperature, iodine concentration etc. on crack extension were surveyed for the purpose of understanding the characteristics of the EPRI model.

Conclusively, it was made clear that crack extension extremely depended on iodine concentration at least for the present subject and that the EPRI model could be sufficiently applied to the verifications of irradiation and outpile data.

Keywords: Crack Extension, EPRI Model, Zircaloy, PCI Failure, LWR, Clading Tube

目 次

1. 序 論	1
2. 解析法	2
2.1 計算コードFEMAXI-Ⅲの概要	2
2.2 EPRIクラック伝播モデルの概要	2
2.3 塑性不安定成長式の設定	3
2.4 クラック進展解析コードFEMCRA	3
2.5 炉外実験解析のための応力計算法	4
3. 結果と解析	4
3.1 照射データ解析結果	4
3.2 関連因子の効果	5
3.3 炉外実験データ解析結果	5
3.4 検 討	6
4. 結 言	6
謝 辞	7
参考文献	7

Content

1. Introduction	1
2. Analytical method	2
2.1 Outline of the code FEMAXI-III	2
2.2 Outline of the EPRI model on crack extension	2
2.3 Equation on plastic unstable growth	3
2.4 Code FEMCRA for analyzing extension	3
2.5 Stress calculation for the analysis of the outpile results	4
3. Results and Discussion	4
3.1 Analytical results of irradiation data	4
3.2 Effects of related parameters	5
3.3 Analytical results of outpile data	5
3.4 Discussion	6
4. Conclusion	6
Acknowledgement	7
References	7

1. 序 言

通常運転時の軽水炉燃料には破損に影響する程の出力に変動を生じる場合がある。燃料の燃焼度が増すにつれ、燃料ペレットはスウェリング等により被覆管に接触する傾向を増し、いわゆる PCI (ペレット・被覆相互作用) を生じ得る。出力変動などの際、この PCI が大きくなると被覆管内に引張り円周応力が発生する。一方、ペレットからは種々の核分裂生成ガス (FP ガス) が燃料棒内に放出される。このうち、特に FP ヨウ素はジルカロイ被覆管と化学的に作用し、被覆材の破壊靱性を低下させる。PCI による応力とこのヨウ素ガスの作用によって、被覆管の内面を始点とする応力腐食割れ (SCC) が生じる。これら一連の現象が、すなわち軽水炉燃料の PCI/SCC 破損で、現在、この挙動を明らかにするための研究が精力的に実施されている。

PCI/SCC 破損とは、換言すれば被覆管内面に発生したクラックが同外面まで貫通する過程であり、従ってクラックの進展を明らかにすることが要求される。軽水炉燃料の照射実験および模擬試料による炉外実験等によって、これまで、幾多の SCC 研究がなされ、PCI/SCC に関する多くの知見が得られている。これらを通して明らかにされていることを列挙すると次のとおりである。

- 1) 被覆管内におけるクラックの始点はジルカロイ材中の不純物原子 (Fe, Ni, Cr その他) の分布する場所であり、これはこれらの原子が FP ヨウ素で腐食され易いことに起因する。
- 2) クラックの始点箇所を断面よりみるとペレット境界部がほとんどである。これは燃料棒長さ方向での被覆管内最大円周応力部に相応している。
- 3) 内面より発したクラックがある深さに達するまでは、クラックはジルカロイ (ジルコニウム) の結晶粒界にそって進展する。
- 4) ある深さ以上 (幾何学的数値ではなく、そこでの状態に依存するものであるが) 進展したクラックは結晶粒内を伝播する。この領域における破面には SCC 破面にしばしば生じているへき開およびフルーティングが観察される。
- 5) クラックがかなり深くなり、クラック先端部の応力集中が増大すると、この位置より被覆管外面まで塑性不安定により急速なクラックの進展を生じる。この領域の破面延性を示すディンプルで構成される。

以上、クラックの進展について記述したが、最近 EPRI (米国電力研究所) の委託によるクラック進展に関する地道な解析がスタンフォード大学の H. Miller 等によって報告された。⁽¹⁾ この仕事は多くの実験データを参照し、クラック進展速度を方式化したものである。

ところで、炉内照射中の燃料棒の変形挙動、被覆管内に生じる応力状態、温度状態さらには対象領域における FP ヨウ素の濃度などを知ることが、挙動解析の際非常に重要なことである。我々はこれらの挙動を求めるため、燃料照射挙動解析用計算コード FEMAXI-III を別に開発している。⁽²⁾ これまで多くの照射データとの検証を行い、前述の照射挙動をかなり正確に計算し得ることを確かめている。

本報に述べる解析研究では以上に述べた2つの計算手法を結合して用いている。FEMAXI-IIIから求められる応力、温度およびヨウ素濃度の値をEPRIモデルのインプットデータとして用い、EPRIモデルによってクラックの進展を解析した。第2章ではFEMAXI-IIIおよびEPRIモデルの各々について主要な点を概説し、解析計算法を記述する。第3章では照射および炉外データとの検証結果およびパラメータサーベイの結果を紹介する。

2. 解 析 法

2.1 計算コードFEMAXI-IIIの概要⁽²⁾

計算コードFEMAXI-IIIは原子炉内での燃料照射挙動を解析するためのプログラムである。これによって燃料棒における温度、変形、応力各状態を求めることができ、さらにFPガス放出量が計算される。燃料棒の変形は軸（長さ）方向で異なり、径方向では同等と仮想されるため、FEMAXI-IIIでは軸対称（AXI symmetric）が用いられ、かつ解析法として2次4角形要素よりなる有限要素法（Finite Element Method: FEM）が採用されている。なおFEMAXI-IIIは原研を主体に関係者との共同で開発した計算コードである。

FEMAXI-IIIによって得られた照射の1時刻におけるアウトプットを次節に述べるEPRIモデルのインプットとして利用している。これらのデータは被覆管内円周方向応力、ペレットおよび被覆管温度およびペレット外に放出されるFPヨウ素濃度である。

2.2 EPRIクラック伝播モデルの概要⁽¹⁾

SCCによるクラックの伝播についてEPRIのモデルは温度、ヨウ素濃度、応力およびクラック長に依存するクラック伝播速度式を次のようにまとめている。

$$\frac{dc}{dt} = f_1(T) \cdot f_2(I_2) \cdot f_3(\sigma, c)$$

$$\begin{cases} f_1(T) = \exp(-Q/RT) \\ f_2(I_2) = I_{\text{eff}} \\ f_3(\sigma, c) = B(\sigma/A_1)^n \cdot \exp\{A_2 \cdot \exp(A_3\sigma) \cdot (c/w)\} \end{cases}$$

ここで

$$\frac{dc}{dt} : \text{クラック伝播速度} \quad [\text{m/sec}]$$

$$T : \text{被覆管内クラック先端温度} \quad [\text{K}]$$

$$Q : \text{ヨウ素表面拡散についての活性化エネルギー} \quad [30,000 \text{ cal/mol}]$$

$$R : \text{気体定数} \quad [1.9858 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}]$$

本報に述べる解析研究では以上に述べた2つの計算手法を結合して用いている。FEMAXI-IIIから求められる応力、温度およびヨウ素濃度の値をEPRIモデルのインプットデータとして用い、EPRIモデルによってクラックの進展を解析した。第2章ではFEMAXI-IIIおよびEPRIモデルの各々について主要な点を概説し、解析計算法を記述する。第3章では照射および炉外データとの検証結果およびパラメータサーベイの結果を紹介する。

2. 解 析 法

2.1 計算コードFEMAXI-IIIの概要⁽²⁾

計算コードFEMAXI-IIIは原子炉内での燃料照射挙動を解析するためのプログラムである。これによって燃料棒における温度、変形、応力各状態を求めることができ、さらにFPガス放出量が計算される。燃料棒の変形は軸（長さ）方向で異なり、径方向では同等と仮想されるため、FEMAXI-IIIでは軸対称（AXIsymmetric）が用いられ、かつ解析法として2次4角形要素よりなる有限要素法（Finite Element Method: FEM）が採用されている。なおFEMAXI-IIIは原研を主体に関係者との共同で開発した計算コードである。

FEMAXI-IIIによって得られた照射の1時刻におけるアウトプットを次節に述べるEPRIモデルのインプットとして利用している。これらのデータは被覆管内円周方向応力、ペレットおよび被覆管温度およびペレット外に放出されるFPヨウ素濃度である。

2.2 EPRIクラック伝播モデルの概要⁽¹⁾

SCCによるクラックの伝播についてEPRIのモデルは温度、ヨウ素濃度、応力およびクラック長に依存するクラック伝播速度式を次のようにまとめている。

$$\frac{dc}{dt} = f_1(T) \cdot f_2(I_2) \cdot f_3(\sigma, c)$$

$$\begin{cases} f_1(T) = \exp(-Q/RT) \\ f_2(I_2) = I_{\text{eff}} \\ f_3(\sigma, c) = B(\sigma/A_1)^n \cdot \exp\{A_2 \cdot \exp(A_3\sigma) \cdot (c/w)\} \end{cases}$$

ここで

$$\frac{dc}{dt} : \text{クラック伝播速度} \quad [\text{m/sec}]$$

$$T : \text{被覆管内クラック先端温度} \quad [\text{K}]$$

$$Q : \text{ヨウ素表面拡散についての活性化エネルギー} \quad [30.000 \text{ cal/mol}]$$

$$R : \text{気体定数} \quad [1.9858 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}]$$

I_{eff} : 実効ヨウ素表面濃度 [kg/m²]

$$I_2 \geq 10^{-3} \rightarrow I_{eff} = 10^{-3}$$

$$I_2 < 10^{-3} \rightarrow I_{eff} = I_2 : \text{ヨウ素濃度}$$

σ : 被覆管内クラック先端部における円周引張り応力 [MPa]

c : クラック長 [m]

w : 被覆管肉厚 [m]

B : 定数 [m³/kg・sec]

$$c/w < 0.02 \rightarrow B = 0$$

$$c/w \geq 0.02 \rightarrow B = 10^{-3}$$

なお、 A_1 , A_2 , A_3 および n は状態に関連する定数で、Table 1 に数値を挙げる。これらの値は照射・未照射ジルカロイ材で異るとともに、また $\sigma^2 C$ との対比で求められている定数 K_{TR} (同表に示す) との大小関係でも異なる値が提示されている。なお K_{TR} が $\sigma^2 C$ より大きいクラック伝播初期の状態は第 1 章に述べたクラックの粒界伝播に相応している。

2.3 塑性不安定成長式の設定

クラック長が増大し、ある状態 (クラック長および被覆管内平均応力) に達すると、クラック先端部における応力集中が増し、耐力を超越してクラックの瞬時塑性不安定成長を生じる。前述の EPRI の報告の中⁽¹⁾ にデータが図示されているが、我々はこれを方式化し、次式を得た。

$$\text{照射材} : \sigma_L = 297.4 \left(\frac{C_L}{w} \right)^4 - 1002.2 \left(\frac{C_L}{w} \right)^3 + 1591.0 \left(\frac{C_L}{w} \right)^2 - 1329.1 \left(\frac{C_L}{w} \right) + 688.6$$

$$\text{未照射材} : \sigma_L = 187.2 \left(\frac{C_L}{w} \right)^4 - 619.6 \left(\frac{C_L}{w} \right)^3 - 1088.5 \left(\frac{C_L}{w} \right)^2 - 1025.1 \left(\frac{C_L}{w} \right) + 554.3$$

ここで

σ_L : 限界応力 [MPa]

C_L : 限界クラック長 [m]

w : 被覆管肉厚 [m]

である。

2.4 クラック進展解析コード FEMCRA

前 3 節に述べた 2 つの解析法を結合して計算コード FEMCRA を編集した。FEMCRA における計算フローチャートを Fig. 1 に示す。

燃料照射実験中のある 1 時刻における燃料棒内の応力、変形、温度状態およびその時刻までに放出される FP などが FEMAXI-III より求められる。FEMAXI-III の次段階の計算は時間 Δt_1 後であり、この間の燃料状態は不変と考えている。クラック進展の計算は Δt_1 より小さい時間 Δt_2 毎になされる。進展速度を求め、 Δt_2 を乗じることによりその時刻におけるクラッ

ク長を求める。このクラック長および応力の関係で塑性不安定成長が生じるか否かを判定し、生じない場合には時間中 Δt_2 を経た後のクラック長計算を繰り返す。FEMAXI 計算の時間中 Δt_1 に達した段階で、新たな燃料状態不変を近似しうるに適当な値としている。

2.5 炉外実験解析のための応力計算法

炉外実験では被覆管試料内圧によって被覆管に円周応力を与え、管側面に付した熱電対により温度を測定している。また初期的に密封空間に入れたヨウ素によりヨウ素濃度を与えている。被覆管内圧と被覆管内円周応力の関係は、肉厚管に適用し得る式を採用する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{r_{12}^2 P_1 - P_2}{1 - r_{12}^2} + \frac{r_1^2 (P_1 - P_2)}{1 - r_{12}^2} \cdot \frac{r}{r_2^2} \quad (r_{12} = r_1/r_2)$$

こゝで

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &: \text{円周応力 (半径 } r \text{ 位置)} && [\text{MP}_a] \\ P_1, P_2 &: \text{内圧および外圧} && [\text{MP}_a] \\ r_1, r_2 &: \text{内径および外径} && [\text{m}] \end{aligned}$$

3. 結果と検討

3.1 照射データ解析結果

スウェーデン・ストッドビクエネルギー技術研究所を研究センターとして、現在、国際協力によるランプ試験計画（軽水炉燃料の出力急昇時における PCI/SCC 破損挙動の研究）が実施されている。本予備解析ではこれらランプ計画のうち既に終了しているインターランプ計画⁽³⁾からの同種 4 本の燃料棒データを検証用として用いた。採用燃料棒（LR 1, LR 2, LR 3 および LR 5）の仕様および照射データの概要を Table 2 に示す。燃料棒 LR 1 は非破損であるが、他の 3 本はそれぞれ異なる時間で破損（すなわち肉厚 100% のクラック進展）を生じている。

Fig. 2 ~ Fig. 5 の解析結果に示すように、ランプ照射実験における一定出力（ランプ出力）保持の間、被覆管内円周応力はペレットのクリープ変形によって緩和する。これらの図の上部は照射中の応力緩和状態を示している。なおこれらは FEMAXI-III 計算コードよりのアウトプットデータである。

Fig. 2 に燃料棒 LR 1 についての計算結果を示す。この図にみられるようにランプ出力中、応力は約 130 MP_a から約 70 MP_a に減少するが、低応力のためクラック進展もこの間で初期クラック 5%（仮定）より約 15% までにとどまっている。図にはヨウ素濃度飽和値（ $I_2 = 10^{-3}$ kg/m³）のパラメトリックな計算例も示したが、この場合には数時間で 100% に達する。

LR 2 燃料棒の場合の計算結果を Fig. 3 に示す。FEMAXI-III コードより得られたヨウ素濃度は 2.3×10^{-3} kg/m³ であり、この場合クラックの進展は殆んどない。最大ヨウ素濃度（ 10^{-3}

ク長を求める。このクラック長および応力の関係で塑性不安定成長が生じるか否かを判定し、生じない場合には時間中 Δt_2 を経た後のクラック長計算を繰り返す。FEMAXI 計算の時間中 Δt_1 に達した段階で、新たな燃料状態不変を近似しうるに適当な値としている。

2.5 炉外実験解析のための応力計算法

炉外実験では被覆管試料内圧によって被覆管に円周応力を与え、管側面に付した熱電対により温度を測定している。また初期的に密封空間に入れたヨウ素によりヨウ素濃度を与えている。被覆管内圧と被覆管内円周応力の関係は、肉厚管に適用し得る式を採用する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{r_{12}^2 P_1 - P_2}{1 - r_{12}^2} + \frac{r_1^2 (P_1 - P_2)}{1 - r_{12}^2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (r_{12} = r_1 / r_2)$$

こゝで

σ_{θ} : 円周応力 (半径 r 位置) [MPa]

P_1, P_2 : 内圧および外圧 [MPa]

r_1, r_2 : 内径および外径 [m]

3. 結果と検討

3.1 照射データ解析結果

スウェーデン・ストッドビクエネルギー技術研究所を研究センターとして、現在、国際協力によるランプ試験計画（軽水炉燃料の出力急昇時における PCI/SCC 破損挙動の研究）が実施されている。本予備解析ではこれらランプ計画のうち既に終了しているインターランプ計画⁽³⁾からの同種 4 本の燃料棒データを検証用として用いた。採用燃料棒（LR 1, LR 2, LR 3 および LR 5）の仕様および照射データの概要を Table 2 に示す。燃料棒 LR 1 は非破損であるが、他の 3 本はそれぞれ異なる時間で破損（すなわち肉厚 100% のクラック進展）を生じている。

Fig. 2 ~ Fig. 5 の解析結果に示すように、ランプ照射実験における一定出力（ランプ出力）保持の間、被覆管内円周応力はペレットのクリープ変形によって緩和する。これらの図の上部は照射中の応力緩和状態を示している。なおこれらは FEMAXI-III 計算コードよりのアウトプットデータである。

Fig. 2 に燃料棒 LR 1 についての計算結果を示す。この図にみられるようにランプ出力中、応力は約 130 MPa から約 70 MPa に減少するが、低応力のためクラック進展もこの間で初期クラック 5%（仮定）より約 15% までにとどまっている。図にはヨウ素濃度飽和値 ($I_2 = 10^{-3}$ kg/m³) のパラメトリックな計算例も示したが、この場合には数時間で 100% に達する。

LR 2 燃料棒の場合の計算結果を Fig. 3 に示す。FEMAXI-III コードより得られたヨウ素濃度は 2.3×10^{-3} kg/m³ であり、この場合クラックの進展は殆んどない。最大ヨウ素濃度 (10^{-3}

kg/m²)での100%到達時間,すなわち約75分に対してLR2は約43分で破損を生じている。

このような傾向はFig.4に示すLR3にもみられる。

さらにFig.5のLR5にも同様の傾向がみられる。この燃料棒におけるヨウ素濃度を仮りにFEMAXI-III計算値の2倍にとるとLR5の破損時間(照射実験出の放出FPは時間的に3段階で検出されている)にはよく一致する結果が得られる。

以上,4本の燃料棒についての計算結果を総括すると計算値と実験値の間にあまりよい一致性はみられない。全体の傾向から察すると全体的に計算したヨウ素濃度が少ないように思える。

3.2 関連因子の効果

EPRIモデルにおける各種因子の効果を調べるためパラメーターサーベイを試みた。それらは初期クラック,応力,温度,ヨウ素濃度および粒界・粒内伝播に関するものなどである。

初期クラックの効果をFig.6に示す。実際の燃料被覆管内面に存在する初期クラックの深さは未知であるが,ジルカロイ材中の不純物原子の腐食分だけ存在し得ることは推察されている。本サーベイでは被覆管肉厚の1,5および10%(約8,40および80μm)の3種の初期クラックについて計算した。100%クラック進展に要する時間は初期クラック長に対して単調に減少している。

応力の効果をFig.7に示す。低応力(約200MPa近辺)では100%進展に要する時間が急激に増大する傾向を示しているが,比較的高応力の領域(約250MPa以上)では単調に減少している。

Fig.8はクラック進展に対する温度の効果である。被覆管の通常使用温度では100%クラック進展時間は単調に減少している。

クラック進展へのヨウ素濃度の効果をFig.9に示す。前述の初期クラック,応力および温度の効果傾向では単調な減少をみたが,同図に明白のようにヨウ素濃度に対しては濃度約 5×10^{-4} kg/m²以下の領域でクラック進展が大きく変化している。前節に述べた照射データ解析中に記述したように,ヨウ素濃度に関するFEMAXI-IIIのアウトプット値は全試料にわたって $2 \sim 4 \times 10^{-4}$ kg/m²の範囲にあり,これらの値は非常に不安定な領域中に存在する。

Fig.10はEPRIのモデルに含まれているクラックの粒界伝播(モード1と名命)および粒内伝播(モード2)についての比較である。EPRIのモデルではいずれにしろモード1からモード2に替わることになるが,モード2の進展速度はやゝ高目である。

3.3 炉外実験データ解析結果

繰返し応力下SCC実験装置⁽⁴⁾を用いてジルカロイ管内クラックの進展による破損実験を行った。実験結果の詳細は別報⁽⁵⁾に述べるが,それらのうち本解析に関連する代表的実験の条件等をTable3に挙げる。実験用試料にはあらかじめ肉厚の約5~15%に相当する4本の初期クラックをジルカロイ管の軸方向に設けた。また実験はヨウ素雰囲気中で行い,さらにヨウ素のクラック進展への寄与も確認している。表に示すような温度および内圧条件下で約1時間以内

に試料は破損（クラック貫通）した。各試料における破損の温度および圧力の関係を Fig. 11 に示す。

クラックの進展の時間的変化の様相を代表実験（No.10, 15およびNo.20）について Fig. 12 に挙げる。実験上の破損時間（図中矢印のFで表示）はそれぞれの実験の計算パラメータとして用いた初期クラックよりの計算値近辺に存在し、実験および計算値に比較的よい一致がみられる。

3.4 検 討

4本の照射試験済燃料棒のクラック進展挙動解析では、FEMAXI-IIIからのアウトプットをそのまま使用すると計算値は実験値とあまりよい一致をみない。しかしながらパラメータサーベイの結果に判るように、応力、温度、ヨウ素濃度などの関連因子のうち、最も進展挙動に影響を与えるものはヨウ素濃度である。

FEMAXI-IIIにおけるヨウ素濃度は、ヨウ素それ自体ではなく、Xeの放出挙動のみより推定している。従って実際には他の崩壊系列（Teの崩壊）からくる安定あるいは準安定ヨウ素（ I^{127} , I^{129} ）などもヨウ素源として加わる。また放出されたガスは、たゞちにプレナムガスと完全混合すると仮定しているのので、ヨウ素濃度はFEMAXI-IIIの計算値より大きいものと推察される。従って照射済データに関するクラック進展に関してもこのことを考慮に入れると計算値は実験値に近づくものと思われる。

本解析は試行的なもので、EPRIモデルの妥当性を調べる第1段階である。照射および炉外の少例について解析を実施したに過ぎないが、本章に記述した解析結果を全体的に眺めてみるとEPRIモデルがかなり現象を着実に表示しているように思える。

今後、種々の照射データ（スウェーデン・ストッドビクにおける諸ランプ照射実験）および炉外実験データに基づいて解析を行う計画であり、それらの結果を反映させてより詳細にモデルの妥当性を調べ、また修正する予定である。なおEPRIモデルへのインプット供給であるFEMAXI-IIIについても、特にヨウ素濃度に対して、検討する計画である。

4. 結 言

通常運転時の軽水炉燃料に生じるPCI/SCC破損挙動解明のための1手段として計算コードによるデータ解析を計画し、一部実施している。特に破損に至るまでの被覆管内クラック進展挙動は未知分野のひとつであり、この解明が要望されている。

最近、米国のEPRIより、被覆管内SCCクラック進展に関する計算モデルが提起された。このモデルは数多くの既存データ（炉内外を含めて）を根底に、理論的考慮も加えて成立しているもので、利用に際しかなり有用なものと思われる。このモデル適用のためには、試料における温度、応力、ヨウ素ガス濃度などのインプットが必要である。燃料試料の照射中におけるこれらの値は、筆者らの研究室が主となって開発した燃料照射挙動解析コードFEMAXI-III

に試料は破損（クラック貫通）した。各試料における破損の温度および圧力の関係を Fig. 11 に示す。

クラックの進展の時間的変化の様相を代表実験（No.10, 15およびNo.20）について Fig. 12 に挙げる。実験上の破損時間（図中矢印の F で表示）はそれぞれの実験の計算パラメータとして用いた初期クラックよりの計算値近辺に存在し、実験および計算値に比較的よい一致がみられる。

3.4 検 討

4本の照射試験済燃料棒のクラック進展挙動解析では、FEMAXI-IIIからのアウトプットをそのまま使用すると計算値は実験値とあまりよい一致をみない。しかしながらパラメータサーベイの結果に判るように、応力、温度、ヨウ素濃度などの関連因子のうち、最も進展挙動に影響を与えるものはヨウ素濃度である。

FEMAXI-IIIにおけるヨウ素濃度は、ヨウ素それ自体ではなく、Xeの放出挙動のみより推定している。従って実際には他の崩壊系列（Teの崩壊）からくる安定あるいは準安定ヨウ素（ I^{127} , I^{129} ）などもヨウ素源として加わる。また放出されたガスは、たゞちにプレナムガスと完全混合すると仮定しているので、ヨウ素濃度はFEMAXI-IIIの計算値より大きいものと推察される。従って照射済データに関するクラック進展に関してもこのことを考慮に入れると計算値は実験値に近づくものと思われる。

本解析は試行的なもので、EPRIモデルの妥当性を調べる第1段階である。照射および炉外の少例について解析を実施したに過ぎないが、本章に記述した解析結果を全体的に眺めてみるとEPRIモデルがかなり現象を着実に表示しているように思える。

今後、種々の照射データ（スウェーデン・ストッドビクにおける諸ランプ照射実験）および炉外実験データに基づいて解析を行う計画であり、それらの結果を反映させてより詳細にモデルの妥当性を調べ、また修正する予定である。なおEPRIモデルへのインプット供給であるFEMAXI-IIIについても、特にヨウ素濃度に対して、検討する計画である。

4. 結 言

通常運転時の軽水炉燃料に生じるPCI/SCC破損挙動解明のための1手段として計算コードによるデータ解析を計画し、一部実施している。特に破損に至るまでの被覆管内クラック進展挙動は未知分野のひとつであり、この解明が要望されている。

最近、米国のEPRIより、被覆管内SCCクラック進展に関する計算モデルが提起された。このモデルは数多くの既存データ（炉内外を含めて）を根底に、理論的考慮も加えて成立っているもので、利用に際しかなり有用なものと思われる。このモデル適用のためには、試料における温度、応力、ヨウ素ガス濃度などのインプットが必要である。燃料試料の照射中におけるこれらの値は、筆者らの研究室が主となって開発した燃料照射挙動解析コードFEMAXI-III

によって別に求めることができる。FEMAXI-ⅢとEPRIモデルの合体による計算コードを編集し、これによって既存の照射データの解析を行った。照射データの検証以外の解析も含めて、次のような結果と知見を得た。

1. 照射データ（国際協力によるインターランプ試験計画）を検証したところ、実験値と計算値の間にあまりよい一致はみられなかった。ヨウ素濃度によって計算値はかなり変動しており、もしEPRIモデルを妥当と考えるならば、FEMAXI-Ⅲにおけるヨウ素濃度算出法を検討する必要があるであろう。
2. EPRIモデルにおけるクラック進展関連因子、すなわち応力、温度、ヨウ素濃度および初期クラック長の効果をサーベイした結果、特にヨウ素濃度の大きな寄与を知ることができた。仮りにFEMAXI-Ⅲのヨウ素濃度計算値が正しいものとするれば、ヨウ素濃度の効果についてのモデル妥当性は今後の課題として注目すべきことと思われる。
3. 炉外基礎実験の検証の結果は、実験値と計算値により一致性がある。さらに検証を進めることにより、むしろ次段階の実験条件の決定（実験時間の設定など）のために本報に述べた解析法を利用し得るものと思われる。

今後、より多くの照射データおよび炉外実験データの検討を行い、かつそれらと合せてモデルの改良を行ってより有用な計算コードを作成する計画である。

謝 辞

解析研究を実施する上で安全工学部燃料安全第一研究室の室員諸氏およびCRCの齊藤、水島両氏に多大の助力を得た。こゝに謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) A. K. Miller et al, "SCCIG: A Phenomenological Model for Iodine Stress Corrosion Cracking of Zircaloy, Volume 1", EPRI NP-1798, Apr. 1981
- (2) 中島鉄雄他, "FEMAXI-Ⅲ - 軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード", JAERI-M 9251, 1981年1月
- (3) 菊地章, 市川達生, "インターランプ計画の研究成果", 日本原子力学会誌 vol. 23, No. 7, PP. 507~, 1981年7月
- (4) 菊地章, 市川達生, "実験装置CL-SCCの概要, 特性, 予備実験および解析用計算コードEXANA", 未公開資料, 1982年5月
- (5) 菊地章, 市川達生, "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

によって別に求めることができる。FEMAXI-ⅢとEPRIモデルの合体による計算コードを編集し、これによって既存の照射データの解析を行った。照射データの検証以外の解析も含めて、次のような結果と知見を得た。

1. 照射データ（国際協力によるインターランプ試験計画）を検証したところ、実験値と計算値の間にあまりよい一致はみられなかった。ヨウ素濃度によって計算値はかなり変動しており、もしEPRIモデルを妥当と考えるならば、FEMAXI-Ⅲにおけるヨウ素濃度算出法を検討する必要があるようである。
2. EPRIモデルにおけるクラック進展関連因子、すなわち応力、温度、ヨウ素濃度および初期クラック長の効果をサーベイした結果、特にヨウ素濃度の大きな寄与を知ることができた。仮りにFEMAXI-Ⅲのヨウ素濃度計算値が正しいものとするれば、ヨウ素濃度の効果についてのモデル妥当性は今後の課題として注目すべきことと思われる。
3. 炉外基礎実験の検証の結果は、実験値と計算値により一致性がある。さらに検証を進めることにより、むしろ次段階の実験条件の決定（実験時間の設定など）のために本報に述べた解析法を利用し得るものと思われる。

今後、より多くの照射データおよび炉外実験データの検討を行い、かつそれらと合せてモデルの改良を行ってより有用な計算コードを作成する計画である。

謝 辞

解析研究を実施する上で安全工学部燃料安全第一研究室の室員諸氏およびCRCの斉藤、水島両氏に多大の助力を得た。こゝに謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) A. K. Miller et al, "SCCIG: A Phenomenological Model for Iodine Stress Corrosion Cracking of Zircaloy, Volume 1", EPRI NP-1798, Apr. 1981
- (2) 中島鉄雄他, "FEMAXI-Ⅲ - 軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード", JAERI-M 9251, 1981年1月
- (3) 菊地章, 市川達生, "インターランプ計画の研究成果", 日本原子力学会誌 vol. 23, No. 7, PP. 507~, 1981年7月
- (4) 菊地章, 市川達生, "実験装置CL-SCCの概要, 特性, 予備実験および解析用計算コードEXANA", 未公開資料, 1982年5月
- (5) 菊地章, 市川達生, "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

によって別に求めることができる。FEMAXI-ⅢとEPRIモデルの合体による計算コードを編集し、これによって既存の照射データの解析を行った。照射データの検証以外の解析も含めて、次のような結果と知見を得た。

1. 照射データ（国際協力によるインターランプ試験計画）を検証したところ、実験値と計算値の間にあまりよい一致はみられなかった。ヨウ素濃度によって計算値はかなり変動しており、もしEPRIモデルを妥当と考えるならば、FEMAXI-Ⅲにおけるヨウ素濃度算出法を検討する必要があるとされる。
2. EPRIモデルにおけるクラック進展関連因子、すなわち応力、温度、ヨウ素濃度および初期クラック長の効果をサーベイした結果、特にヨウ素濃度の大きな寄与を知ることができた。仮りにFEMAXI-Ⅲのヨウ素濃度計算値が正しいものとするならば、ヨウ素濃度の効果についてのモデル妥当性は今後の課題として注目すべきことと思われる。
3. 炉外基礎実験の検証の結果は、実験値と計算値により一致性がある。さらに検証を進めることにより、むしろ次段階の実験条件の決定（実験時間の設定など）のために本報に述べた解析法を利用し得るものと思われる。

今後、より多くの照射データおよび炉外実験データの検討を行い、かつそれらと合せてモデルの改良を行ってより有用な計算コードを作成する計画である。

謝 辞

解析研究を実施する上で安全工学部燃料安全第一研究室の室員諸氏およびCRCの斉藤、水島両氏に多大の助力を得た。こゝに謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) A. K. Miller et al, "SCCIG: A Phenomenological Model for Iodine Stress Corrosion Cracking of Zircaloy, Volume 1", EPRI NP-1798, Apr. 1981
- (2) 中島鉄雄他, "FEMAXI-Ⅲ - 軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード", JAERI-M 9251, 1981年1月
- (3) 菊地章, 市川達生, "インターランプ計画の研究成果", 日本原子力学会誌 vol. 23, No. 7, PP. 507~, 1981年7月
- (4) 菊地章, 市川達生, "実験装置CL-SCCの概要, 特性, 予備実験および解析用計算コードEXANA", 未公開資料, 1982年5月
- (5) 菊地章, 市川達生, "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

Table 1 Coefficients in the EPRI model

	Irradiated Zircaloy		Un-irradiated Zircaloy	
	$\sigma_{RC}^2 < K_{TR}$	$\sigma_{RC}^2 > K_{TR}$	$\sigma_{RC}^2 < K_{TR}$	$\sigma_{RC}^2 > K_{TR}$
K_{TR}	6.16	6.16	3.57	3.57
A_1	9.69×10^{-2}	9.18×10^{-3}	2.07	1.39
A_2	9.93	6.6	18.91	10.78
A_3	2.9×10^{-3}	2.9×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.45×10^{-3}
n	2.47	2.0	3.63	3.48

K_{TR} [(Mpa)²m], A_1 (Mpa), A_2 (-), A_3 (Mpa)⁻¹, n (-)

Table 2 Specification and irradiation data of the fuel rods tested in the Studsvik Inter Ramp Project

Specification	BWR standard type fuel rods Pellet density.....95 %TD Cladding.....Recrystallized Zry-2 Rod.....P/C gap : 0.15 mm diam.				
	Fuel rods	LR1	LR2	LR3	LR5
Irradiation data	PB high	370	334	344	332
	low	264	205	223	217
	Burnup	11.1	9.3	9.8	9.6
	PR	438	457	501	427
	TF	1440	46/61	11	162/194/212
	Failure?	NF	F	F	F

PB (w/cm)...Base irradiation power
PR (w/cm)...Ramping power
Burnup (Gwd/tU)
TF (min)...Time to failure

Table 3 Experimental conditions in the outpile tests and failure time

Sample	Temperature (°C)	Pressure (kg/cm ²)	Failure time (min)
No.8	400.0	400-380	40
No.10	400.0	370-360	30
No.12	350.0	420-400	25
No.13	370.0	395-375	36
No.14	350.0	420	57
No.15	370.0	407-400	20
No.17	355.0	423-415	25
No.20	350.0	410	50

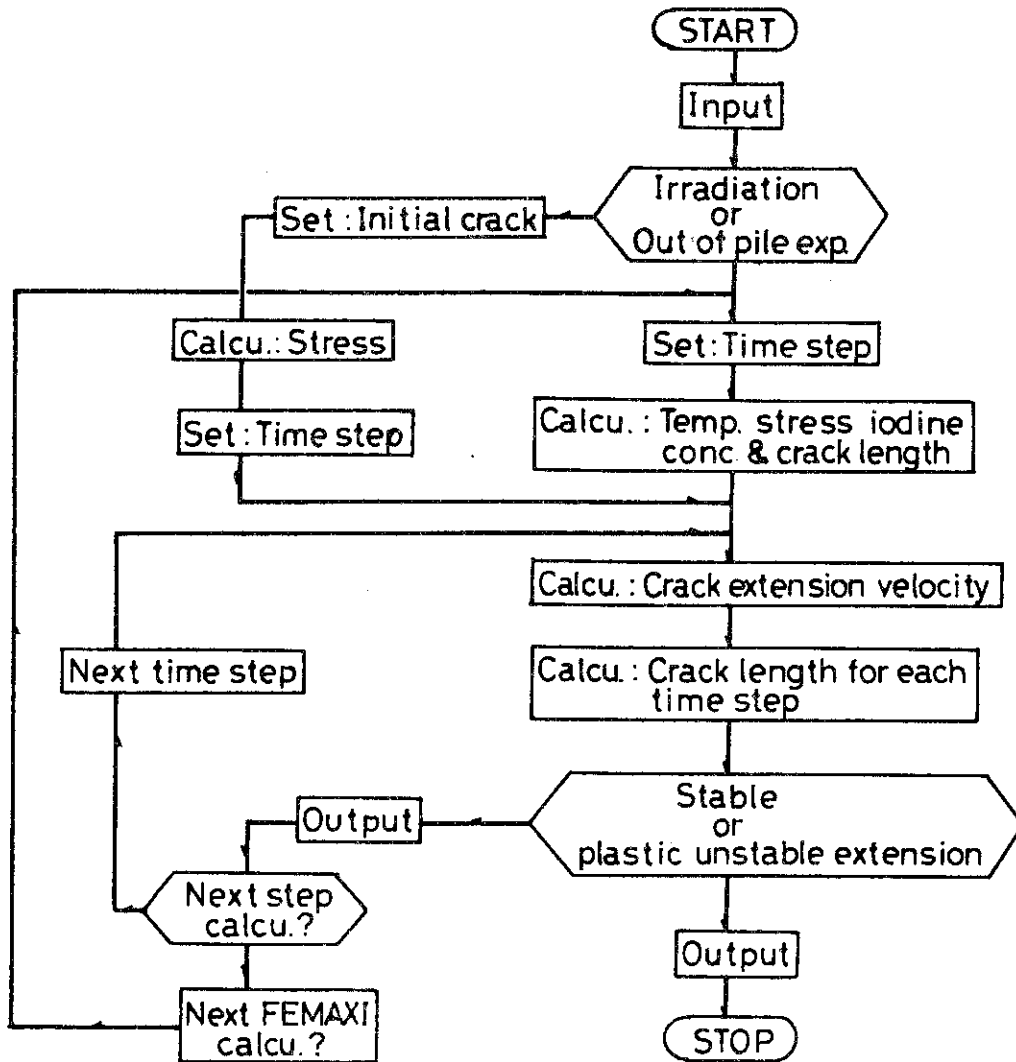


Fig. 1 Flow chart for the calculation of crack extension

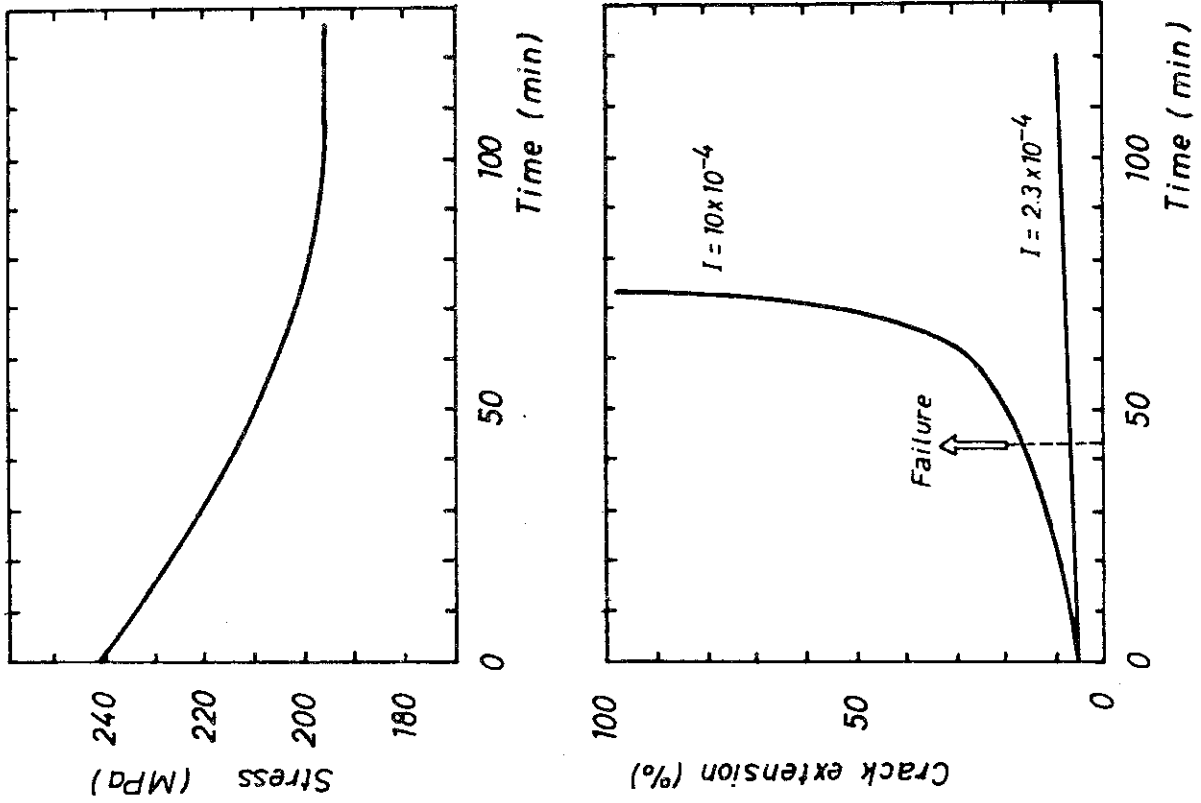


Fig. 3 Crack extension calculated for the rod LR2

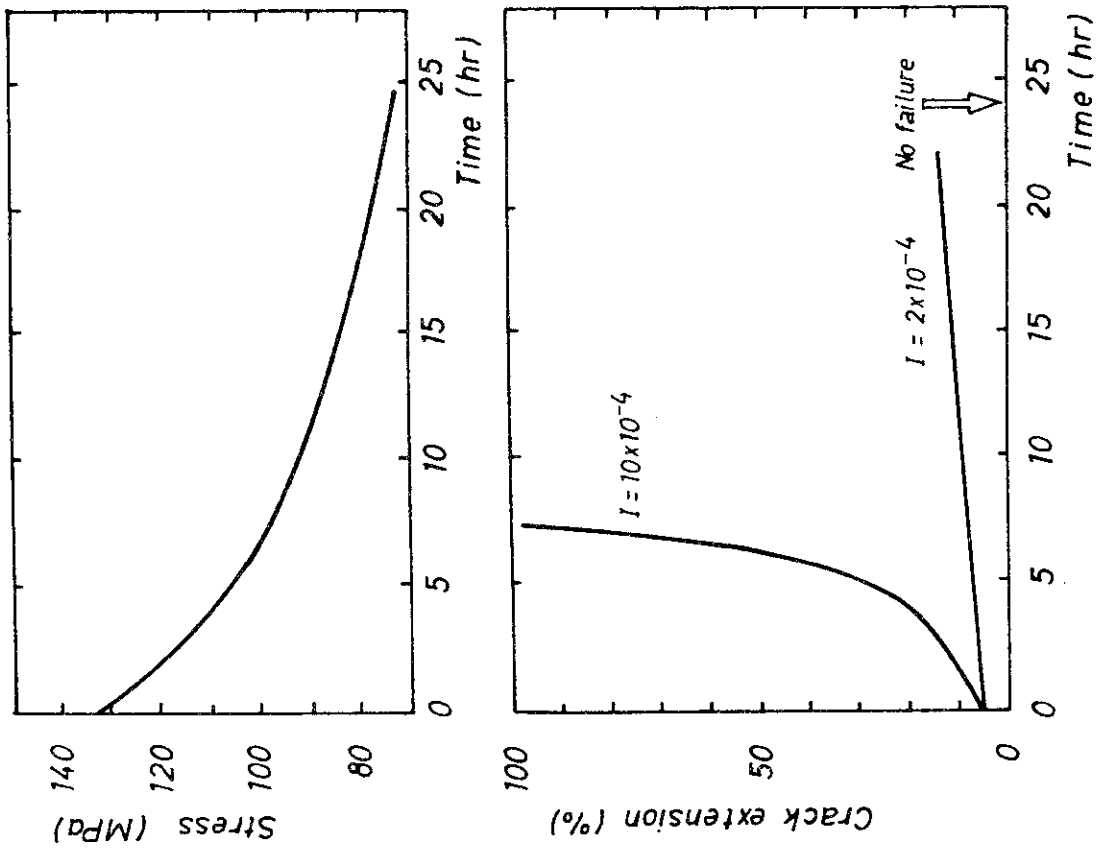


Fig. 2 Crack extension calculated for the rod LR1

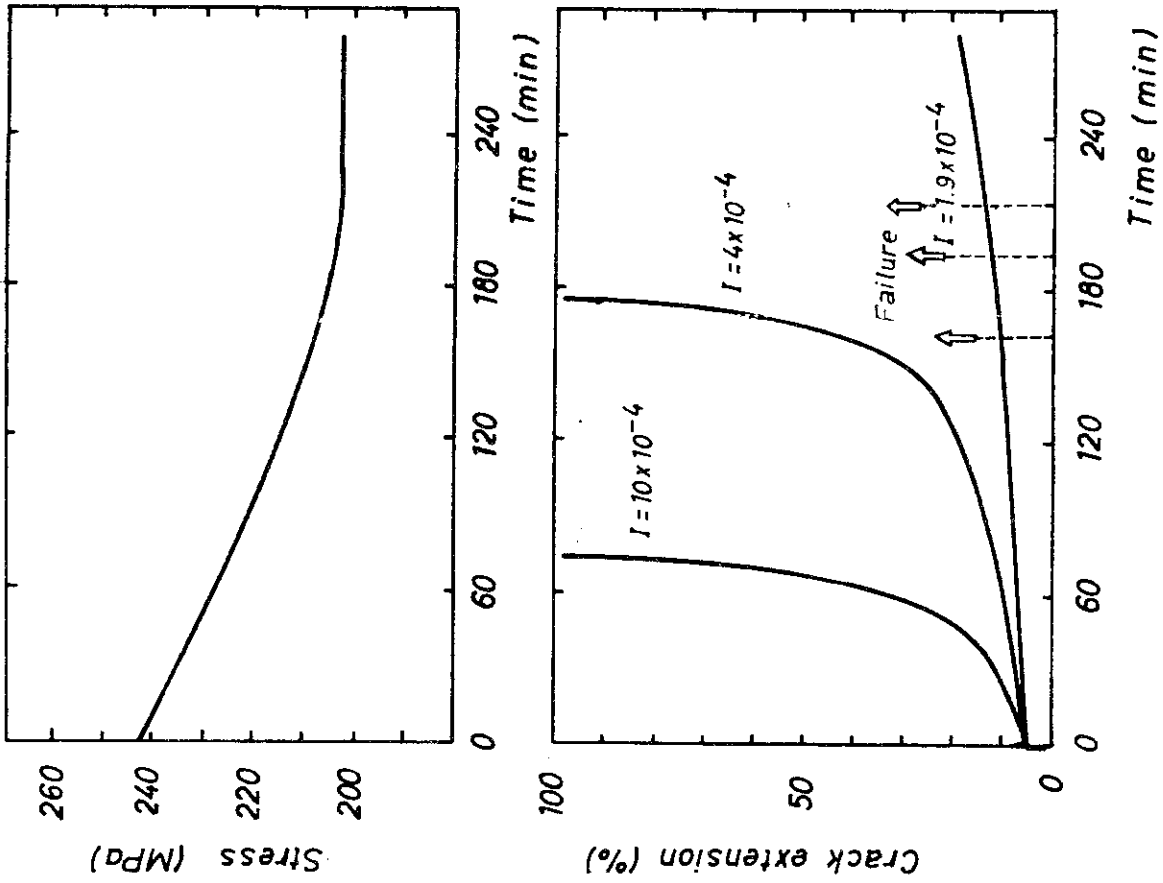


Fig. 5 Crack extension calculated for the rod LR5

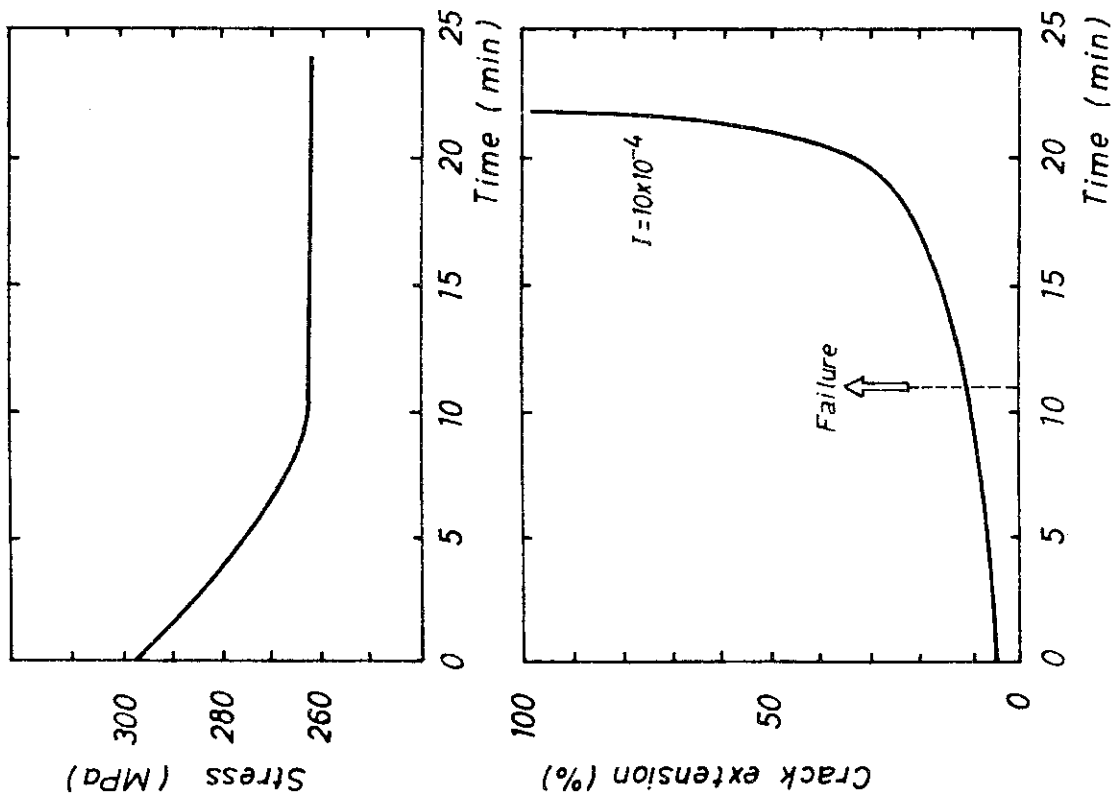


Fig. 4 Crack extension calculated for the rod LR3

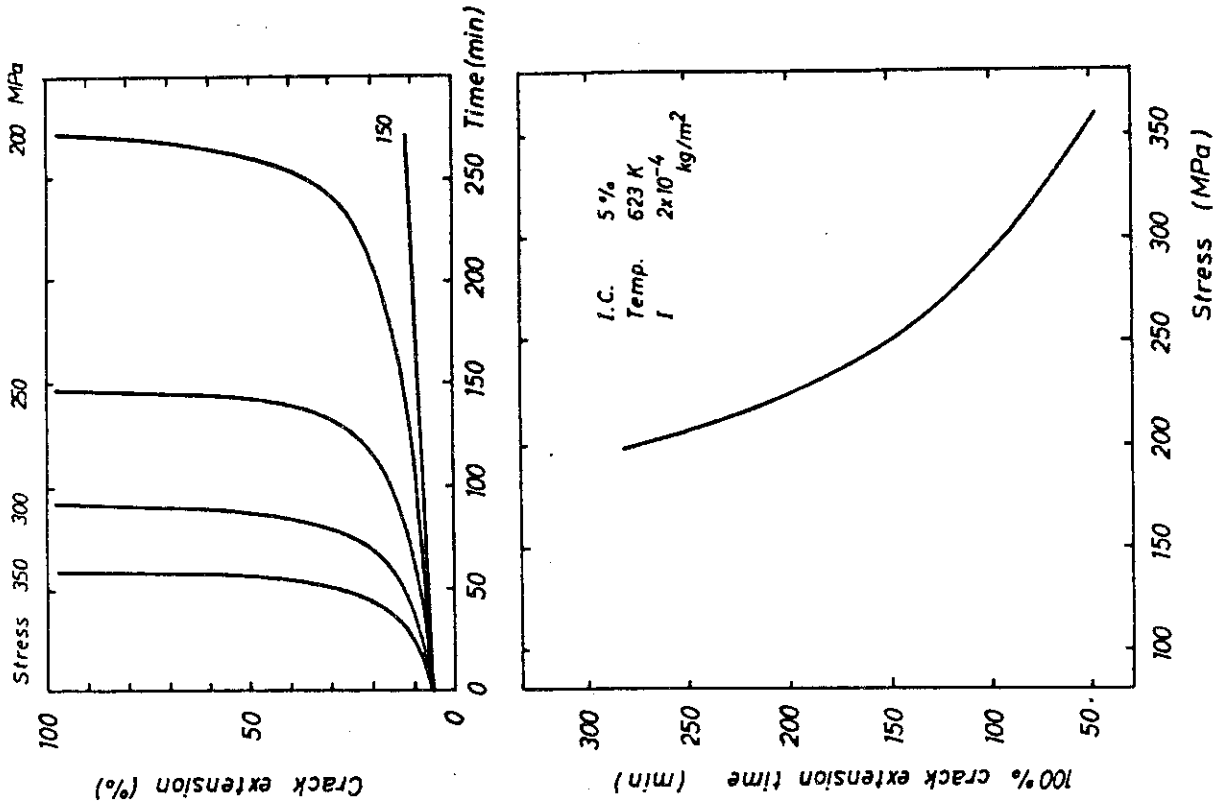


Fig. 7 Effect of stress on crack extension

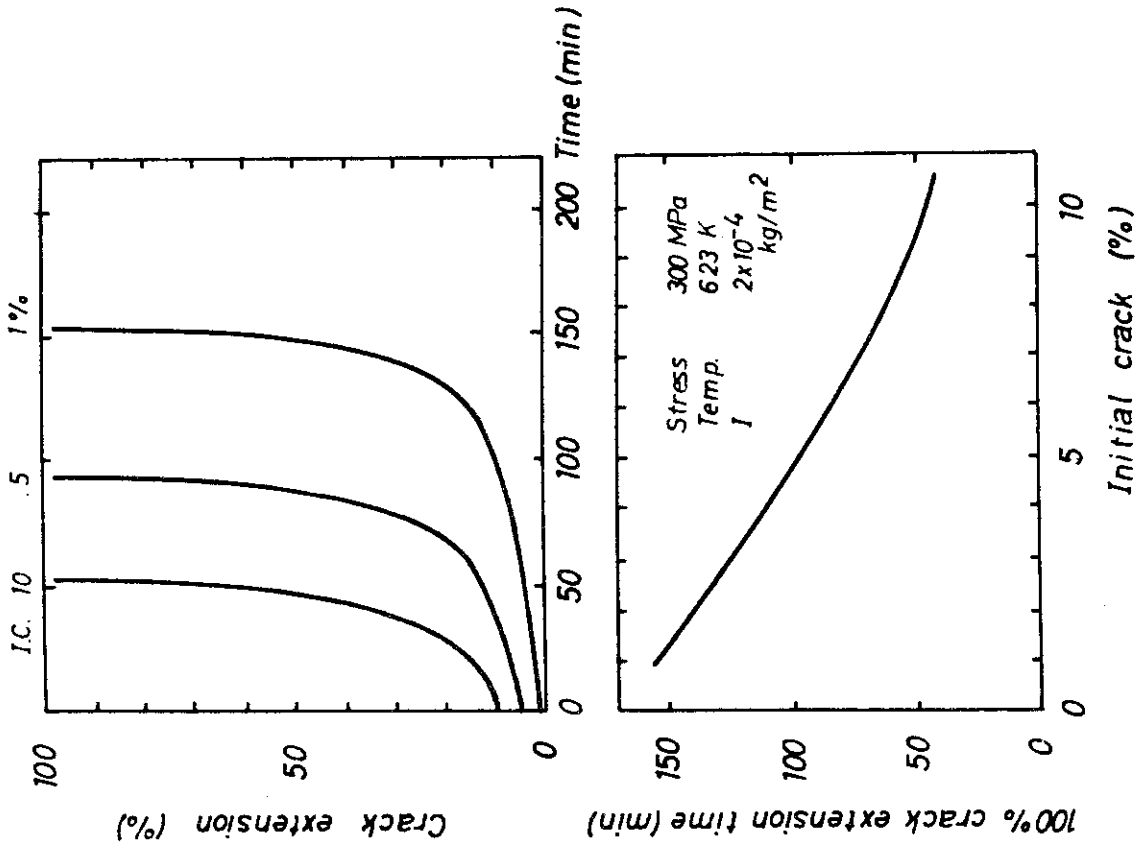


Fig. 6 Effect of initial crack length on crack extension

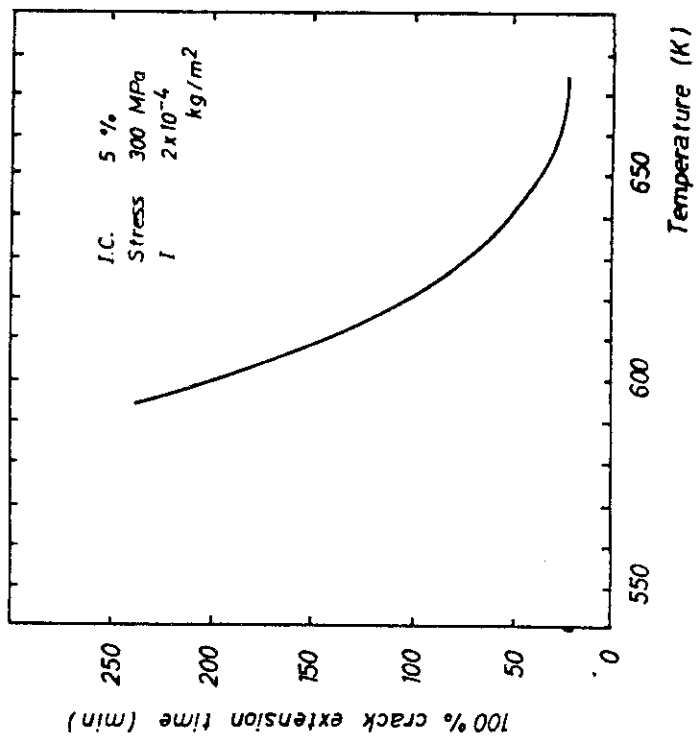
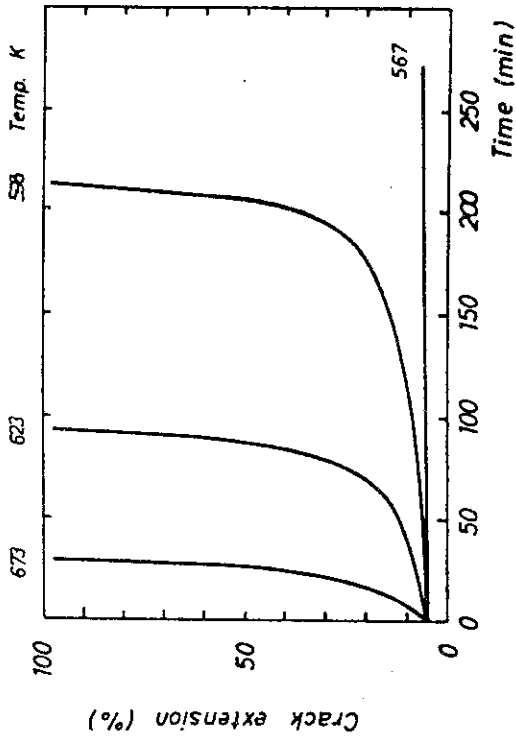
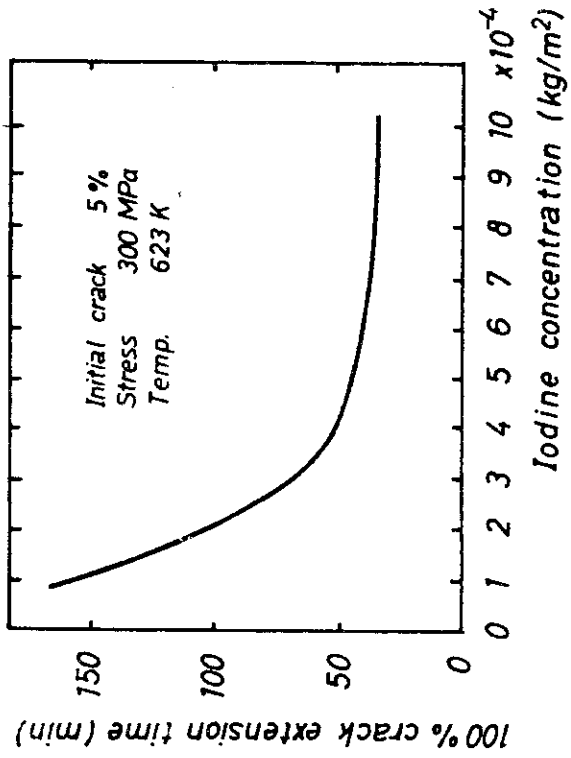
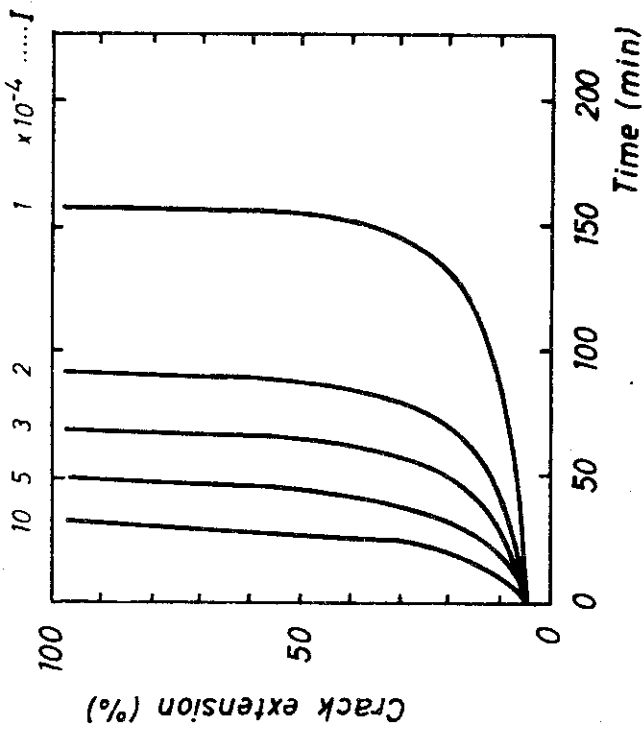


Fig. 9 Effect of iodine concentration on crack extension

Fig. 8 Effect of temperature on crack extension

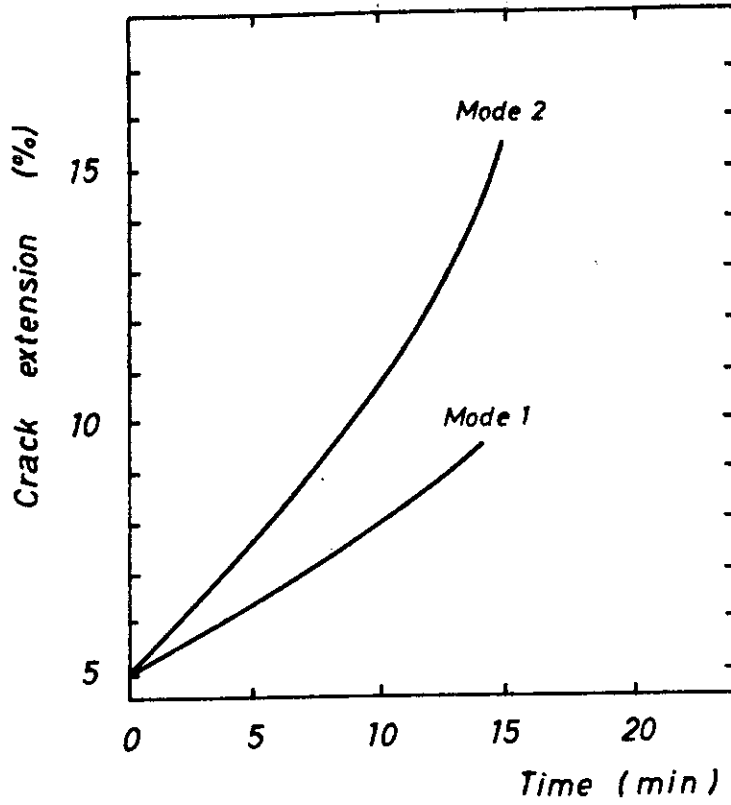


Fig. 10 Effect of extension mode on crack extension

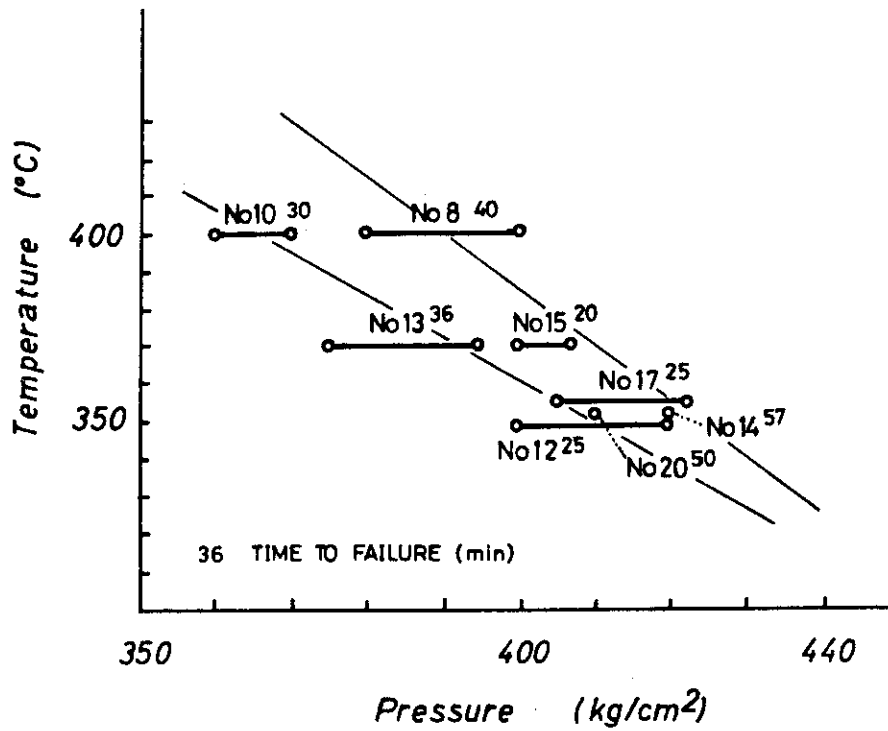


Fig. 11 Relation between temperature and pressure on failure resulting from the outpile tests

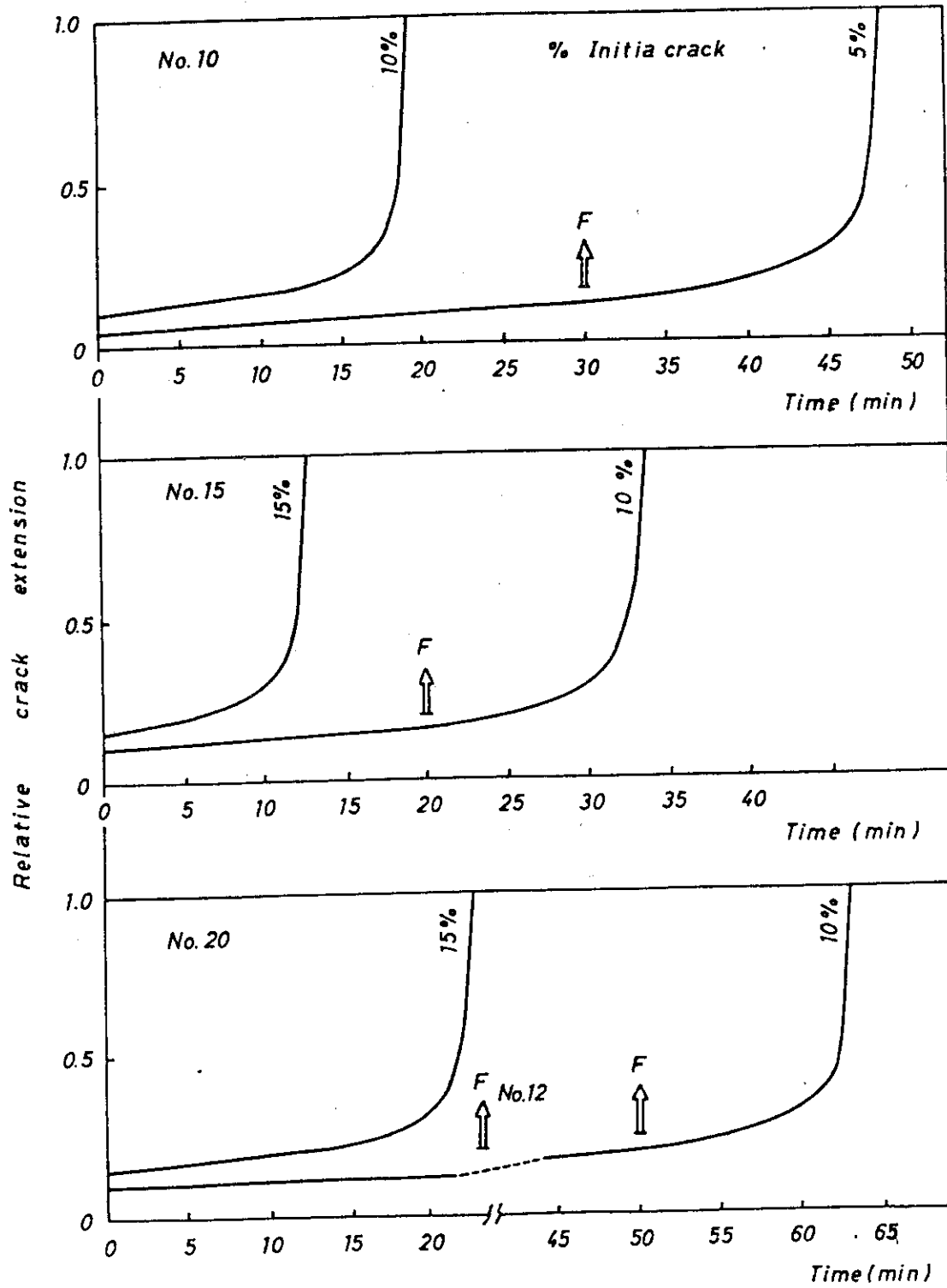


Fig. 12 Analytical results of crack extension for the typical outpile tests