

JAERI-M  
84-208

軽水炉圧力容器の寿命予測評価と  
材料試験上の課題

1984年11月

中島 伸也・中島 甫・近藤 達男

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 Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

---

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

軽水炉圧力容器の寿命予測評価と材料試験上の課題

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

中島 伸也・中島 甫・近藤 達男

(1984年10月22日受理)

軽水炉圧力容器の寿命予測評価のため、特に材料試験データに主眼をおいた基本的予測計算プログラム(RPVLE-I)を作成した。このプログラムは多くの仮定を設けることを前提としており、試計算の結果、材料試験上の課題として次のことが明らかとなった。

- 1) 定常状態における高応力比の繰り返し数および応力幅は寿命に大きく影響する。
- 2) 非破壊検査の検出限界は、材料の破壊靱性値や腐食疲労などによるき裂進展速度などと組合せて決める必要がある。
- 3) 初期の破壊靱性値は望ましい最低値が存在する。
- 4)  $\Delta K_{th}$  あるいは  $K_{ISCC}$  などのデータ蓄積が寿命計算上重要である。
- 5) 高温高圧水中での新しいき裂モニタ法、き裂開閉口および水化学分析に関する技術の検討が必要である。

Evaluation of Life Prediction for Light Water Reactor  
Pressure Vessel and its Relevant Theme  
for the Materials Testing

Nobuya NAKAJIMA, Hajime NAKAJIMA and Tatsuo KONDO  
Department of Fuels and Materials Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 22, 1984)

The preliminary evaluation program (RPVLE-I) is developed to estimate the residual life for the light water reactor. This program is based on the material data such as crack growth, fracture toughness and so on, and includes the temporary assumptions to shorten the practical calculation time. The exercises are solved by means of this program and several theme for materials testing are made clearly as shown below;

- 1) In the normal reactor condition, the residual life is strongly affected with the number of cycles and stress range under high stress ratio (R) condition.
- 2) The limit of the nondestructive evaluation must be referred to the data of the fracture toughness and the crack growth rate in high temperature water environment.
- 3) At the initial condition, the required minimum fracture toughness value exist.
- 4) The necessity of the data base for  $\Delta K_{th}$  and  $K_{ISCC}$  are emphasized to estimate the residual life.
- 5) The new technologies must be developed such as the crack growth mesurment, the crack closure mesurment and the water chemistry analysis in the high temperature and high pressure water environment.

Keywords; Reactor Pressure Vessel, Life Predictive Evaluation,  
RPVLE-I Program, Corrosion Fatigue, Fracture Toughness,  
Stress Ratio, Low Alloy Steel.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 寿命予測評価手法 .....	1
2.1 寿命計算上の前提条件 .....	2
2.2 寿命予測の計算手法 (RPVLE-I プログラム) .....	6
3. 試計算の結果 .....	8
3.1 炉の運転に係る要因 .....	8
3.2 圧力容器の材質に係る要因 .....	10
4. 討論, 考察 .....	11
4.1 寿命予測評価からみた課題 .....	12
4.2 材料試験上の課題 .....	13
5. ま と め .....	14
参考文献 .....	15

## Contents

1. Preface .....	1
2. Method of the life predictive evaluation .....	1
2.1 Assumption on the life predictive evaluation .....	2
2.2 Content of RPVLE-I Program .....	6
3. Results of the exercises .....	8
3.1 Factor for the reactor operation .....	8
3.2 Factor for the material properties .....	10
4. Discussion and Consideration .....	11
4.1 Theme on the life predictive evaluation .....	12
4.2 Theme on the material testing .....	13
5. Conclusion .....	14
Reference .....	15

## 1. ま え が き

軽水炉圧力容器は一般に ASME Code Sec III<sup>1)</sup> に従った設計手法によって設計、建設され、原子炉の使用開始後は ASME Code Sec XI<sup>2)</sup> に従ってその健全性および安全性を確保する考え方になっている。

実際問題として、原子炉の寿命予想を実施するためには欠陥、応力、材質および環境の4要素を知ることが必要となる。具体的には非破壊検査による欠陥の検出、その大きさ、その位置の同定、さらに、定常時における総合応力分布、事故時(破壊)を仮想した最大の応力分布とその種類、欠陥の存在する場の材質およびその周辺の材質、すなわち圧延材か溶接部などの種類、欠陥の存在する局所的な環境条件、例えば温度、中性子照射の有無あるいはその程度、さらには水質などを総合的に検討する必要がある。この総合的検討、評価を実施するためにはそれらの各外的条件が欠陥のその後の挙動にどのような影響を及ぼすかを知ることが最大の課題であり、この命題に係る材料試験研究もその目的に合致した試験条件、方法の選択が必要となってくる。しかし、これらの検討を試みるためには、現在不明な点が多い。

上述した観点から、軽水炉圧力容器の使用開始後の寿命予測をいくつかの仮定の下に<sup>3)</sup> 簡単な寿命予測を実施するための計算プログラム(Reactor Pressure Vessel Life Evaluation - I, 略してRPVLE - I)を作成し、この計算プログラムを使用して、各入力因子の寿命に及ぼす影響を検討した。計算時間を短縮するため、入力因子は暫定値を設定しそれに基づき、寿命予測上およびそれに必要な材料試験上の課題について検討し、今後の材料試験の進め方あるいは従来より得られているデータのデータベース作成に当たってのデータ整備上の課題についても検討した。

以上の目的に対して、主に次の項目について検討した。

1. ASME Code Sec XIにおけるき裂形状(アスペクト比)が寿命予測に及ぼす効果
2. 定常運転条件(Normal Condition)、運転禁止条件(Faulted Condition)の各応力の寿命に及ぼす効果
3. 中性子照射が寿命予測評価に及ぼす効果
4. ASME Code Sec XI, 初期の国産材(Medium S材)および現在の国産材(Low S材)を想定した各々の腐食疲労き裂進展曲線( $da/dN-\Delta K$  曲線)を使った時の寿命予測評価の比較

## 2. 寿命予測評価方法

ここで作成した、寿命予測計算用プログラムは全ての軽水炉圧力容器の評価に使用できるわけではなく、当初の材料試験上の知見を得ることが目的であるため、多くの前提、制約条件の

## 1. ま え が き

軽水炉圧力容器は一般に ASME Code Sec III<sup>1)</sup> に従った設計手法によって設計、建設され、原子炉の使用開始後は ASME Code Sec XI<sup>2)</sup> に従ってその健全性および安全性を確保する考え方になっている。

実際問題として、原子炉の寿命予想を実施するためには欠陥、応力、材質および環境の 4 要素を知ることが必要となる。具体的には非破壊検査による欠陥の検出、その大きさ、その位置の同定、さらに、定常時における総合応力分布、事故時（破壊）を仮想した最大の応力分布とその種類、欠陥の存在する場の材質およびその周辺の材質、すなわち圧延材か溶接部などの種類、欠陥の存在する局所的な環境条件、例えば温度、中性子照射の有無あるいはその程度、さらには水質などを総合的に検討する必要がある。この総合的検討、評価を実施するためにはそれらの各外的条件が欠陥のその後の挙動にどのような影響を及ぼすかを知ることが最大の課題であり、この命題に係る材料試験研究もその目的に合致した試験条件、方法の選択が必要となってくる。しかし、これらの検討を試みるためには、現在不明な点が多い。

上述した観点から、軽水炉圧力容器の使用開始後の寿命予測をいくつかの仮定の下に<sup>3)</sup> 簡単な寿命予測を実施するための計算プログラム（Reactor Pressure Vessel Life Evaluation - I, 略して RPVLE - I）を作成し、この計算プログラムを使用して、各入力因子の寿命に及ぼす影響を検討した。計算時間を短縮するため、入力因子は暫定値を設定しそれに基づき、寿命予測上およびそれに必要な材料試験上の課題について検討し、今後の材料試験の進め方あるいは従来より得られているデータのデータベース作成に当たってのデータ整備上の課題についても検討した。

以上の目的に対して、主に次の項目について検討した。

1. ASME Code Sec XIにおけるき裂形状（アスペクト比）が寿命予測に及ぼす効果
2. 定常運転条件（Normal Condition）、運転禁止条件（Faulted Condition）の各応力の寿命に及ぼす効果
3. 中性子照射が寿命予測評価に及ぼす効果
4. ASME Code Sec XI, 初期の国産材（Medium S材）および現在の国産材（Low S材）を想定した各々の腐食疲労き裂進展曲線（ $da/dN-\Delta K$  曲線）を使った時の寿命予測評価の比較

## 2 寿命予測評価方法

ここで作成した、寿命予測計算用プログラムは全ての軽水炉圧力容器の評価に使用できるわけではなく、当初の材料試験上の知見を得ることが目的であるため、多くの前提、制約条件の



上に成り立っている。このため、以下にこのRPVLE-Iプログラムの前提・制約とそのプログラムの計算方法について述べる。このRPVLE-Iのさらに一般化される計算プログラムについては、別途報告する。

## 2.1 寿命予測評価方法

軽水炉には加圧水型(PWR)と沸騰水型(BWR)があるが、ここでは肉厚が180mmのBWR圧力容器をモデル形状として考える。

寿命評価に当って、寿命評価の対象とする条件を決める必要がある。この場合いろいろな考え方が成り立つと考えられるが本論においては次に述べる立場で検討する。

- a) 圧力容器には潜在的あるいは非破壊検査の検出限界を考慮して、ある長さの欠陥が存在するものと想定して、初期き裂長さ $A_0$ を設定する。
- b) 欠陥の存在に伴う、応力拡大係数 $K$ の算出はASME Code Sec XIの表面欠陥における $K$ 値計算に従う。
- c) 初期き裂長さから炉運転の起動停止および定常運転時の過渡状態に対応した高応力比の繰返しによる応力の組合せに基づく疲労によってき裂は成長する。すなわち、腐食疲労き裂進展曲線(いわゆる $da/dN-\Delta K$ 曲線)に従ってき裂は成長する。
- d) き裂先端における破壊靱性値 $K_{IC}$ と事故時を想定した時の事故条件応力に基づく応力拡大係数 $K$ との比較によって、原子炉の運転禁止条件を設定する。
- e) 炉の運転開始時の初期破壊靱性値 $K_{IC}$ については288°Cでの具体的な値がないため、暫定値を設けて処理する。この値は炉の運転サイクルが進むに従って中性子照射の影響を受けて低下するものとする。

以上のa)~e)の前提に対して1) 圧力容器内表面の欠陥形状、2) き裂の応力拡大係数 $K$ の計算、3) 応力波形とき裂進展速度、4) 炉の運転禁止条件、および5) 破壊靱性値と中性子照射効果について以下に述べる。

### 1) 圧力容器内表面の欠陥形状

圧力容器用鋼材の欠陥を考える場合、表面き裂と内部き裂、あるいは位置としては①圧力容器の胴部(Belt Line)、②胴部と鏡部の接続部および③圧力容器と配管の接続部(Nozzle Corner)を議論する必要があるが、ここでは、②および③、あるいは内部き裂の議論を割愛し、①の軽水に接する圧力容器内表面に存在する表面き裂を検討の対象とする。

この表面き裂の形状効果は図1に示す量アスペクト比( $A/L$ )によって特徴付けをする。同図には $A/L=0.25$ の場合を示すが、計算プログラムではアスペクト比 $A/L=0.1$ 、 $0.25$ および $0.50$ の3種について検討する。 $A/L=0.1$ はき裂の間口( $L$ )が広く、奥行き( $A$ )が浅いき裂であり、 $A/L=0.5$ はすなわち半円形のき裂断面を示している。

また、疲労に伴うき裂の拡大に対して、現在のところ $A/L$ と時間あるいは、くり返し寿命との関係が明らかでないため、以後の検討においては、この $A/L$ の形状が相似的に拡大すると仮定したモデルを使用する。

## 2) き裂の応力拡大係数Kの計算

表面き裂の応力拡大係数Kの計算は基本的にはASME Code Sec XI, Appendix Aの解析手法に従った。すなわち、応力拡大係数 $K_1$ は次式による。

$$K_1 = \sigma_m M_m \sqrt{\pi} \sqrt{A/Q} + \sigma_b M_b \sqrt{\pi} \sqrt{A/Q} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_m$ 、 $\sigma_b$  : 膜応力および曲げ応力

A : 表面き裂の深さ

Q : 欠陥形状係数

$M_m$  : 膜応力の補正係数

$M_b$  : 曲げ応力の補正係数

欠陥形状係数Qは各々アスペクト比(A/L)に対して、ASME CodeのA/L-Q曲線より次の各式を最小二乗法による多項式近似(ここでは3次式)を用いて決定した。

i) A/L=0.1の場合の欠陥形状係数Q(0.1)は

$$Q(0.1) = 0.01019 * R_{st}^3 - 0.1825 * R_{st}^2 \\ - 0.009201 * R_{st} + 1.1181 \quad (2)$$

ii) A/L=0.25の場合の欠陥形状係数Q(0.25)は

$$Q(0.25) = 0.006537 * R_{st}^3 - 0.2217 * R_{st}^2 \\ - 0.002129 * R_{st} + 1.4708 \quad (3)$$

iii) A/L=0.50の場合の欠陥形状係数Q(0.50)は

$$Q(0.50) = 0.1594 * R_{st}^3 - 0.5020 * R_{st}^2 \\ - 0.1456 * R_{st} + 2.440 \quad (4)$$

であり、ここで $R_{st} = (\sigma_m + \sigma_b) / \sigma_y$ であり、 $\sigma_y$ は材料の降伏応力である。

膜応力の補正係数 $M_m$ についてもASME Codeの図より最小二乗法による多項式近似によって導びいた次式を使用した。

i) A/L=0.1の場合の膜応力補正係数 $M_m(0.1)$ は

$$M_m(0.10) = 1.3907 * (A/T)^3 + 1.808 * (A/T)^2 \\ + 0.05321 * (A/T) + 1.0981 \quad (5)$$

ii) A/L=0.25の場合の膜応力補正係数 $M_m(0.25)$ は

$$M_m(0.25) = 0.2930 * (A/T)^3 + 0.7301 * (A/T)^2 \\ - 0.05450 * (A/T) + 1.0916 \quad (6)$$

iii)  $A/L = 0.50$  の場合の膜応力補正係数  $M_m(0.50)$  は

$$M_m(0.50) = 0.8667 * (A/T)^3 + 1.097 * (A/T)^2 + 0.4744 * (A/T) + 1.029 \quad (7)$$

であり、ここで  $A$  はき裂深さ、 $T$  は肉厚である。

曲げ応力の補正係数  $M_m$  も同様な処理によって求めた下記の各式を使用した。

i)  $A/L = 0.10$  の場合の曲げ応力補正係数  $M_b(0.10)$  は

$$M_b(0.10) = 2.817 * (A/T)^3 - 0.3923 * (A/L)^2 - 0.9216 * (A/T) + 1.0692 \quad (8)$$

ii)  $A/L = 0.25$  の場合の曲げ応力補正係数  $M_b(0.25)$  は

$$M_b(0.25) = 0.2574 * (A/T)^3 + 0.3802 * (A/T)^2 - 1.363 * (A/T) + 1.0522 \quad (9)$$

iii)  $A/L = 0.50$  の場合の曲げ応力補正係数  $M_b(0.50)$  は

$$M_b(0.50) = 0.2746 * (A/T)^3 - 0.3141 * (A/T)^2 - 1.355 * (A/T) + 1.0179 \quad (10)$$

ここで、 $A$  および  $T$  はき裂深さおよび肉厚である。

膜応力および曲げ応力の圧力容器内の肉厚方向への分布は、直線近似の分布をするものとしたモデルを仮定して、肉厚内各部の応力を算出する方法を採った。

### 3) 応力波形とき裂進展速度

本プログラムによる寿命予測計算においては、炉の運転に伴う応力の変化を簡単な波形におきかえて使用した。実際の炉の運転開始・停止あるいは運転中の過渡的現象時の応力スペクトラムはここで仮定するように単純なものでは無い。しかし、現実の問題として、複雑な応力波形を仮定したとしても、それに付合するき裂進展速度などの材料試験データや確実な実機の応力記録が無い。ここでは図2に示す応力変化を概念化して使用した。すなわち、運転開始時は応力比  $R$  が 0.25 以下の低い (Low  $R$  と記する) き裂進展速度 ( $da/dN - \Delta K$  曲線) のデータに従って所定の応力  $St$  まで応力が上昇し、ここで  $St$  に対して  $\pm 10\%$  すなわち、低応力が  $0.9 * St$  および高応力が  $1.1 * St$  となる高応力比 (High  $R$ ) にて繰り返し応力を受けるものと仮定した。この時、 $St$  は具体的には膜応力  $St(m)$  および曲げ応力  $St(b)$  である。この High  $R$  領域での繰り返し数  $N$  はプログラム中の取扱いとしては任意の値を入力することになり、この Low  $R$  および  $N$  回の High  $R$  の繰り返し応力の組合せに対してここでは 1 Block と呼ぶこととする。この 1 Block は実機の原子炉では約 10ヶ月あるいは 1 サイクルに相当するものである。

Low  $R$  データは図3に示す ASME, Low  $R$  (低硫黄材: 最近の国産圧力容器の材質相当) および Medium  $S$  (中硫黄材: 初期の国産圧力容器の材質相当) と大気中データの各曲線を用いた。一方、High  $R$  データは図4に示す同様のき裂進展速度 ( $da/dN$ ) と応力拡大係数範

囲 ( $\Delta K$ ) の関係を用いた。図 3 および 4 における ASME の曲線は ASME Code Sec XI に推奨されている  $da/dN - \Delta K$  曲線である。

Low R データの Low S 材および Medium S 材は、現在日本原子力研究所・構造安全研究委員会・腐食疲労専門部会で進めている共通試験において著者が実験によって得たデータを基に、ASME 曲線を参考にして暫定的に決定した曲線である。

High R データについてはいずれもはっきりしたデータがない現状であるため、Low R データから決定した基準線を、機械的に ASME 曲線の Low R と High R の差分のみ平行移動して、暫定的な High R 曲線を決定した。ここで Low S 材および Medium S 材はこの種の腐食疲労挙動に対して、鋼中の硫黄 (S) が大きく寄与をするという最近の研究報告を基に、国産の压力容器で最近に生産、製作された鋼中 S 含有量に相当するものおよび比較的初期の鋼材に相当するものである。

図中の各曲線に対して、Stage I から III までを記したが、これは Stage I が大気中曲線の一部であり、各曲線は Stage I, II および III の 3 つの直線によって構成されている。ここでは、き裂進展速度が最も遅い場合は大気中データであるという立場で処理した。後述する図に出てくる  $H =$ 、あるいは  $L =$  の数字は High R および Low R の各 Stage 数を示している。

プログラム計算の上では前述した応力拡大係数範囲に対するこれら図 3 および 4 の各 Stage に対応するき裂進展速度を求め、計算に資することになる。

#### 4) 炉の運転禁止条件

前節で初期き裂長さから、腐食疲労挙動によってき裂が進展することを述べた。そこで、き裂はどこまで安定な進展が可能であるか判定をする必要がある。

本プログラムにおいてはこの判定を、その時々き裂長さに対して、事故時を仮定した膜応力および曲げ応力によって応力拡大係数  $K$  をき裂進展に伴って随時計算し、その時のき裂端部の中性子照射脆化を考慮した破壊靱性値と比較し、前者が後者を上廻った時点で、その炉が運転禁止条件に達したと見なす。実機では、この時点は炉の詳細な点検と炉の補修等の必要性の検討が要求されることに相当する。

ここで用いた暫定的な応力は、き裂の存在する場所によってその応力値および内容に差が出て来る。最終的には膜応力と曲げ応力を適切に決める必要があるが、ここではかなり大づかみな値を考えている。

#### 5) 破壊靱性値と中性子照射効果

压力容器を構成する鋼材を含め金属材料は 0.1 MeV 以上の速い中性子の照射を受けると一般にその性質が変化する。例えば、硬さや引張強さが高くなる反面、伸び、延性あるいは靱性が低下することがよく知られている。

一方、中性子照射材の腐食疲労によるき裂進展速度は非照射の材料と同一挙動を示し、現在のところ重畳効果は認められないとする考えが一般的である。

寿命評価を実施するに当たっては、これら中性子照射による効果として破壊靱性値の低下という要素のみを検討の対象として考慮する。引張特性中でも降伏応力も中性子照射によって変化

するが寿命予測においてはき裂端部の歪場の大きさに影響を与えるものと考えられるが、その程度は比較的少ないため、ここでは無視することにした。

破壊靱性値の低下に関しては、破壊靱性試験結果についてまだ十分評価されたデータが無いためここでは、シャルピ衝撃値の上部棚エネルギーの低下率と中性子照射量の関係を図5のモデルに従うものとした。すなわち、

$$i) \quad n < 10^{16} \quad \text{の場合} \quad R_n = 0.05 \quad (11)$$

$$ii) \quad n \geq 10^{16} \quad \text{の場合} \quad R_n = 0.05 * \log n - 0.75 \quad (12)$$

ここで、 $n$ は中性子照射量、 $R_n$ は上部棚エネルギーの低下率である。

一方、破壊靱性値 $K_{IC}$ と上部棚領域におけるシャルピ衝撃値 $C_V$ の間には、次式の関係の成立することが知られている<sup>5)</sup>

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = \alpha \frac{C_V}{\sigma_y} + \beta \quad (13)$$

そのため、非照射材の破壊靱性値 $K_{IC}^*$ と照射材の破壊靱性値 $K_{IC}$ は次式の関係となる。

$$K_{IC} = \sqrt{1 - R_n} * K_{IC}^* \quad (14)$$

さらに、中性子照射量は圧力容器の内表面から外表面に進むに従って、照射量に分布があることがよく知られている<sup>6)</sup>。この現象をここでは図6のように照射量が内表面より外表面に向けて減少するものとし、中性子照射量の分布式は(15)式とする。

$$n = 2.172 * 10^{-4} * t^4 - 0.573 * 10^{-2} * t^3 \\ + 6.372 * 10^{-2} * t^2 - 0.373 * t + 1 \quad (15)$$

ここで、 $t$ は内表面からの距離である。

このように中性子照射量、強いては中性子脆化量は靱性に当して平方根の形で寄与するものとした。

## 2.2 寿命予測の計算手法 (RPVLE-I プログラム)

本寿命予測の計算プログラムRPVLE-Iへの入力データについては大きく分けて、第1群：炉の構成材料によって決めるデータ、第2群：炉の形状によって決めるデータおよび第3群：任意に入力するデータとなり、以下にそれら各群の内容について触れる。

第1群：炉の構成材料によって決めるデータ

- i)  $S_y$  : 使用材料の降伏応力
- ii)  $K_{IC}$  : 使用材料の破壊靱性値

第2群：炉の形状によって決めるデータ

- i)  $n/B$  : 単位Block当りの炉内表面における中性子照射量
- ii)  $N/B$  : 単位Block当りのHigh Rにおける荷重繰返し数
- iii)  $St-n$  : 定常状態における $St(m)$ と $St(b)$

第3群：任意に入力するデータとしては、

- i)  $A/L$  : アスペクト比 ( $A/L = 0.10, 0.25, 0.50$ )
- ii)  $St-f$  : 炉運転禁止条件を求めるための事故時を想定した  $St(m)$  および  $St(b)$
- iii)  $\Delta A_H$  : High Rにおける1 stepによるき裂の増分(この値を大きくすると、計算時間は短縮するが、計算に対する累積誤差が増大する。)
- vi)  $A_f$  : 計算停止のためのき裂長さ制限

図7はこれらの入力データとRPVLE-Iプログラムの基本概念を示したものである。また、以下にプログラムの流れに従って各Stepごとに説明する。

- Step 0 : 上述した、第1群、第2群および第3群のデータを個々に入力するか、あるいはループ形式で計算するかを選択する。
- Step I : 新しいBlock計算を開始し、その時のき裂長さを  $A_0$  (初期においては  $A_s$ ) 単位ブロック内においては中性子照射量は一定とした。
- Step II :  $A_0, S_{t-n}, A/L$  によってその時のLow RにおけるK値 ( $K_{NL}$ ) を計算する。
- Step III : K値から  $da/dN - \Delta K$  のLow R曲線から  $N = 1$  回のき裂増分  $\Delta A_L$  を計算する。
- Step IV : 仮定したHigh Rにおける1 stepのき裂増分  $\Delta A_H$  の半分をき裂に加算し、そのき裂長さでK値 ( $K_{NH}$ ) を得る。
- Step V :  $da/dN - \Delta K$  のHigh R曲線よりこのK値の  $da/dN$  を求め、 $dN = \Delta A_H / da/dN$  を計算して、 $\Delta N$  を求める。これを加算する ( $\Sigma \Delta N$ )。
- Step VI : き裂長さにさらに  $\Delta A_H / 2$  を加算する。このき裂長さ、破壊を想定した応力  $St-f$  によって、K値 ( $K_F$ ) を求める。  
一方、破壊靱性値は中性子照射脆化を考慮した計算値 ( $K_C$ ) を求める。
- Step VII : 破壊靱性値  $K_{IC}$  と破壊条件による  $K_F$  を比較する。 $K_{IC} \leq K_F$  になった場合は、炉は破壊条件を満たし不安定あるいは急速破壊につながる可能性があるわけで、炉は停止する必要があることを意味する。プログラムはここで計算を中止し、結果(き裂長さ  $A$ 、寿命Block数等)を出力印字する。  
一方、 $K_C > K_F$  の場合は炉の運転は計算上可能であると判断され、炉の運転は継続されることになる。すなわち計算は継続することとなる。
- Step VIII : Step V で求めた  $\Delta N$  を加算した  $\Sigma \Delta N$  と単位Block当りのHigh Rの繰り返し数  $N$  の比較をおこなって  $\Sigma \Delta N \geq N$  の場合は、炉としては1 Block終了したことになり、炉は停止状態に入る。計算としては次のBlockに入ったものとして計算が進行する。  
一方、 $\Sigma \Delta N < N$  の場合にはStep IVへプログラムは進み同じBlockの計算を引き続き計算することとなる。

以上が基本的なプログラムの概要である。

このプログラムでは例えば初期き裂長さを非破壊検査によるき裂の検出値を入力し、計算上のき裂長さ制限  $A_f$  を入力すると、あるき裂長さからあるき裂長さまでの寿命計算をすることが可能となる。

### 3 試計算の結果

前章までに述べた、RPVLE-Iプログラムを使った主要入力因子について、各因子の炉寿命 (Block 数) あるいはき裂長さ変化量を用いて、その定量的な評価を試計算する。ここで検討する因子は基本的にイ) 炉の運転に係る要因と、ロ) 材質に係る要因の2つに大別される。以下に、これら2要因について述べる。ここでイ) に含まれる因子は5因子、ロ) に含まれる因子は3因子であり、合計8因子の組合せを単純に実施すると64通りになるが、ここでは部分的に各因子の暫定値を設けることによって計算例の数を減らした。ここではあくまでも、各因子の傾向あるいは注意すべき挙動に関する知見を得ることが大切であって、結果の絶対値そのものは大した意味を持っていない。

#### 3.1 炉の運転に係る要因

炉の運転に係る要因には1) アスペクト比の効果、2) 定常応力の効果、3) 破壊時を想定した過大荷重による応力の効果、4) 中性子照射の効果および5) High R状態における繰り返し数の効果が挙げられる。以下、順次これらの因子について検討する。なお、ここで扱う  $da/dN - \Delta K$  曲線は ASME Code の曲線である。

##### 1) アスペクト比の効果 (ASME 曲線の場合)

図8にアスペクト比  $A/L = 0.10, 0.25$  および  $0.50$  についてき裂進展がこのアスペクト比を保持して進行するものと仮定してみた時のき裂長さ変化 (Crack Length) と寿命 (Blocks) の関係を示す。なお、その他の因子の前提条件も合わせて図8に示す。また、同図には寿命評価計算に使用したき裂長さ各過程における、High R および Low R の ASME Code の  $da/dN - \Delta K$  曲線における Stage 番号 (図3および4参照) も示した。この結果より次のことが知られる。

- i)  $A/L = 0.1, 0.25, 0.50$  の順で寿命に対するき裂長さの増加速度は低くなる。特に  $A/L = 0.1$  ではき裂長さが  $T/4$  に到達前に炉の運転禁止条件に達する。
- ii) き裂長さが  $T/2$  までにおいては、ASME Code の  $da/dN - \Delta K$  曲線では High R データは全て Stage II である。また、Low R データにおいては、Stage II および III であって、その Stage II から III に変化する点はアスペクト比が  $A/L = 0.1, 0.25, 0.50$  と増加するに従って、長き裂長さ側、長寿命側へと変化する。

以上が基本的なプログラムの概要である。

このプログラムでは例えば初期き裂長さを非破壊検査によるき裂の検出値を入力し、計算上のき裂長さ制限  $A_f$  を入力すると、あるき裂長さからあるき裂長さまでの寿命計算をすることが可能となる。

### 3 試計算の結果

前章までに述べた、RPVLE-Iプログラムを使った主要入力因子について、各因子の炉寿命 (Block 数) あるいはき裂長さ変化量を用いて、その定量的な評価を試計算する。ここで検討する因子は基本的にイ) 炉の運転に係る要因と、ロ) 材質に係る要因の2つに大別される。以下に、これら2要因について述べる。ここでイ) に含まれる因子は5因子、ロ) に含まれる因子は3因子であり、合計8因子の組合せを単純に実施すると64通りになるが、ここでは部分的に各因子の暫定値を設けることによって計算例の数を減らした。ここではあくまでも、各因子の傾向あるいは注意すべき挙動に関する知見を得ることが大切であって、結果の絶対値そのものは大した意味を持っていない。

#### 3.1 炉の運転に係る要因

炉の運転に係る要因には1) アスペクト比の効果、2) 定常応力の効果、3) 破壊時を想定した過大荷重による応力の効果、4) 中性子照射の効果および5) High R状態における繰り返し数の効果が挙げられる。以下、順次これらの因子について検討する。なお、ここで扱う  $da/dN - \Delta K$  曲線は ASME Code の曲線である。

##### 1) アスペクト比の効果 (ASME 曲線の場合)

図8にアスペクト比  $A/L = 0.10, 0.25$  および  $0.50$  についてき裂進展がこのアスペクト比を保持して進行するものと仮定してみた時のき裂長さ変化 (Crack Length) と寿命 (Blocks) の関係を示す。なお、その他の因子の前提条件も合わせて図8に示す。また、同図には寿命評価計算に使用したき裂長さ各過程における、High R および Low R の ASME Code の  $da/dN - \Delta K$  曲線における Stage 番号 (図3および4参照) も示した。この結果より次のことが知られる。

- i)  $A/L = 0.1, 0.25, 0.50$  の順で寿命に対するき裂長さの増加速度は低くなる。特に  $A/L = 0.1$  ではき裂長さが  $T/4$  に到達前に炉の運転禁止条件に達する。
- ii) き裂長さが  $T/2$  までにおいては、ASME Code の  $da/dN - \Delta K$  曲線では High R データは全て Stage II である。また、Low R データにおいては、Stage II および III であって、その Stage II から III に変化する点はアスペクト比が  $A/L = 0.1, 0.25, 0.50$  と増加するに従って、長き裂長さ側、長寿命側へと変化する。



iii) 以後の評価においてはき裂長さ増加が比較的大きいアスペクト比  $A/L = 0.1$  を暫定値として使用する。

## 2) 定常応力の効果 (ASME 曲線の場合)

寿命評価計算における定常時の応力について、運転開始から運転停止までを図 2 に示す応力波形で進行するわけであるが、その応力は基本的に Max-St(m) (最大の膜応力 (Membrane Stress)) と Max-St(b) (最大の曲げ応力 (Bending Stress)) になり、High R である定常運転継続時は  $1.1 \times \text{Max-St} \sim 0.9 \times \text{Max-St}$  (膜応力および曲げ応力ともに) で繰り返し変動している。図 9-1 および 9-2 にはこの Max-St(m) および Max-St(b) について、運転禁止条件までの寿命を示す。ここでは压力容器胴部の欠陥を評価しているために、Max-St(b) は比較的低応力の値を試算に採用した。なお、他の前提条件は両図中に示す。

図 9-1 および 9-2 より知られることを要約すると次のようになる。

- i) ほぼ  $\text{Max-St}(m) = 20 \text{ kg/mm}^2$  を境いにして、寿命は大きく変化し、本形状の压力容器の膜応力を内圧のみによって、簡単な薄肉円筒モデルで計算すると約  $15 \text{ kg/mm}^2$  程度であるため、それに熱応力と過荷重を含めほぼ  $20 \text{ kg/mm}^2$  を暫定値として使用する。
- ii) Max-St(b) は応力そのものが低いためと、胴部の剛性そのものが大きいため、曲げ応力の寿命に与える効果は少ないものと考えられる。暫定値としては、 $\text{Max-St}(b) = 0.75 \text{ kg/mm}^2$  を使用する。

## 3) 破壊時を想定した過大荷重による応力効果

破壊条件としての破壊応力は基本的にここでは、Faulted-St(m) (破壊条件としての膜応力 (membrane stress)) と Faulted-St(b) (破壊条件としての曲げ応力 (bending stress)) に要約され、事故時の種々の応力発生要因を考慮すべきであるが、ノズルコーナ部などとは異なって、事故時の曲げ応力は胴部の剛性からして、地震荷重などを含めないで、比較的低く押さえられている。

図 10-1 および 10-2 にそれぞれ Faulted-St(m) および Faulted-St(b) に対する寿命におよぼす効果について示す。両図より  $\text{Faulted-St}(m) = 20 \text{ kg/mm}^2$  ,  $\text{Faulted-St}(b) = 45 \text{ kg/mm}^2$  以下の応力では寿命変化に対する両応力の影響は少く、逆に、この値より応力が大きくなると、寿命は急激に低下し、前者で  $35 \text{ kg/mm}^2$  , 後方で  $65 \text{ kg/mm}^2$  でほぼ寿命は 2 Blocks より少なくなる。なお、ここで使用した前提条件は両図に示した通りである。

これらの結果から次の点を要約できる。

- i) Faulted-St は膜応力および曲げ応力ともに寿命に対しては同様の傾向を示す。
- ii) 両応力の暫定値としては、 $\text{Faulted-St}(m) = 20 \text{ kg/mm}^2$  ,  $\text{Faulted-St}(b) = 45 \text{ kg/mm}^2$  を使用する。

## 4) 中性子照射の効果

压力容器に照射する中性子量はその対象とする炉の大きさや構造によって、その程度に大小がある。本寿命評価においては、その欠陥が胴部にあるものと仮定した計算を取扱うため、当

然、この中性子照射の効果を検討する必要がある。図11に1 Block当りの中性子照射量に対する、運転禁止条件までの寿命を示す。中性子照射量としては、BWR高出力すなわち压力容器直径の大きい・低中性子照射の場合からFBRのような高中性子照射量に近い状態までを検討しているが、同図より単位Blockに当する中性子照射量は寿命に大きな影響を与えないことが知られる。暫定的な計算値としては、 $n/B=10^{18}$ を使用する。

#### 5) High R状態における繰り返し数Nの効果

図12にHigh Rにおける繰り返し数Nの単位Block当りの数 $N/B$ として $N/B=10\sim 8000$ までを示した。 $N/B=10$ の寿命は $N/B=2000$ 以上の寿命に比べて5~10倍の寿命を示す。すなわち、このことは原子炉は定常運転時における高応力、低応力幅の応力変動が寿命に対して大きく影響を与えることがわかる。なお、この繰り返し数 $N/B$ は実際問題としてどの程度であるかよく分らないため、暫定値としては $N/B=3000$ の値を使用する。

### 3.2 压力容器の材質に係る要因

压力容器の材質に係る要因としては、1) 初期き裂長さの効果、2) 初期破壊靱性値 $K_{IC}$ の効果、3) 材料間の比較が挙げられる。以下これらの各要因と寿命あるいは、き裂の成長との関係を述べる。なお、1)および2)については $da/dN-\Delta K$ 曲線はASME Code 曲線を使用する。

#### 1) 初期き裂長さ $A_s$ の効果

寿命評価の計算を開始する初期条件としてのき裂長さ $A_s$ を $A_s=2\sim 25$ mmまでについて、その時の寿命評価結果を図13に示す。ここでの○印は各因子の暫定値によって、炉運転禁止条件に達するまでの寿命を示す。また○印は炉運転禁止条件に達する前にき裂自体が炉の肉厚を貫通することを示す。すなわち、Leak Before Break (LBBと略す)状態であることとなる。同図より次のことが知られる。

- i) 初期き裂長さ $A_s=5$ mm以上になると、炉運転禁止条件までの寿命は急激に低下し、 $A_s=20$ mm程度であると寿命は2 Blocksを下廻る。
- ii) 同図の暫定値の条件からでは炉の非破壊検査技術に基づく欠陥検出限界は10mm以下であることが望まれる。
- iii) 暫定値としての $A_s$ は以後 $A_s=5$ mmとして計算に使用する。

#### 2) 初期破壊靱性値 $K_{IC}$ の効果

図14に初期破壊靱性値 $K_{IC}$ に対する寿命(Block)変化を示す。ここでは $K_{IC}=100\sim 500$ kg/mm<sup>3/2</sup>の幅について検討した。同図中の高 $K_{IC}$ 域に見られる○印は、運転禁止条件にき裂長さが到達する前にき裂が压力容器の肉厚を貫通すること(すなわち、LBB)を示す。この図より得られる知見をまとめると次のようになる。

- i) 破壊靱性値 $K_{IC}=300$ kg/mm<sup>3/2</sup>までは初期破壊靱性値が寿命に対して大きく影響を

与えるが、それ以上では影響は少ない。

- ii) ここでの暫定条件での計算において、初期破壊靱性値  $K_{IC}$  は約  $300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  以上を確保することが必要となる。このため ASME 曲線の暫定的破壊靱性値として  $K_{IC} = 300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  とする。

### 3) ASME 曲線, Low S (低硫黄) 曲線, および Medium S (中硫黄) 曲線の比較

本章ですでに述べてきたように、寿命評価に対する各因子について、その変化の傾向を検討し、各因子の暫定値を各々決めた。ここでは、これら各因子の暫定値を使用し、 $da/dN-\Delta K$  曲線を ASME, Low S 材および Medium S 材の 3 種類の曲線について寿命に対するき裂長さの変化と各曲線の計算過程ごとの Stage 数について検討した。図 15 にその結果を示す。なお、同図には  $J_{IC}$  試験より求めた破壊靱性値  $K_{IC}$  も示した。すなわち、Low S 材および Medium S 材の破壊靱性値は各々  $650$  および  $400 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  であると仮定した。また ASME 曲線の破壊靱性値は  $300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  を暫定値とした。

同図より知られる点を要約すると次のようになる。

- i) Low S および Medium S 材の 2 曲線が  $T/2$  を越えるき裂長さの成長を示すことに対して ASME 曲線による計算ではそれ以前に炉の運転禁止条件に達している。これは、ASME 曲線の破壊靱性値  $K_{IC}$  が他に比べて低いと仮定したことおよび腐食疲労き裂進展速度が早いことによる。
- ii) ASME 曲線は High R および Low R の Stage I の段階が無いのに対して、Low S 曲線あるいは Medium S 曲線は High R および Low R とともに、Stage I が寿命全体に占める割合が大きい。
- iii) Low S 材と Medium S 材の間では、大きな寿命に対する差異が認められないが、これは、 $da/dN-\Delta K$  曲線を仮定した (図 3 および 4 参照) 時の、この Stage I, II および III の各段階の特に Stage I から II, II から III に変化する比較的低  $\Delta K$  領域のデータが不十分であり、これを前述した仮定で  $da/dN-\Delta K$  曲線を暫定的に決め、寿命評価計算に使用したためであり、このことは逆説的に、この領域での  $da/dN-\Delta K$  データを精度よく知ることが寿命予測上重要なことを示している。

## 4 討 論 , 考 察

前章までに寿命予測計算の暫定的な入力データ値を用いて各入力因子についてその寿命に及ぼす効果について検討し、さらに ASME Code における参照き裂進展速度データ  $da/dN-\Delta K$  と国産の初期および最近製造されている材料に相当する材料データを仮定して、3 者の比較をおこなった。その結果として、国産材について ASME Code の参照  $da/dN-\Delta K$  曲線で寿命評価を検討することがいかに現実的でないかをうかがい知ることができた。しかしながら、これらの結果はどれも暫定的な仮定を採り入れた計算であるため、得られた結果そのものの数値は大きな意味を持たないことを強調したい。それは以下に述べるいくつかの寿命評価上の

与えるが、それ以上では影響は少ない。

- ii) ここでの暫定条件での計算において、初期破壊靱性値  $K_{IC}$  は約  $300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  以上を確保することが必要となる。このため ASME 曲線の暫定的破壊靱性値として  $K_{IC} = 300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  とする。

### 3) ASME 曲線, Low S (低硫黄) 曲線, および Medium S (中硫黄) 曲線の比較

本章ですでに述べてきたように、寿命評価に対する各因子について、その変化の傾向を検討し、各因子の暫定値を各々決めた。ここでは、これら各因子の暫定値を使用し、 $da/dN-\Delta K$  曲線を ASME, Low S 材および Medium S 材の 3 種類の曲線について寿命に対するき裂長さの変化と各曲線の計算過程ごとの Stage 数について検討した。図 15 にその結果を示す。なお、同図には  $J_{IC}$  試験より求めた破壊靱性値  $K_{IC}$  も示した。すなわち、Low S 材および Medium S 材の破壊靱性値は各々  $650$  および  $400 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  であると仮定した。また ASME 曲線の破壊靱性値は  $300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$  を暫定値とした。

同図より知られる点を要約すると次のようになる。

- i) Low S および Medium S 材の 2 曲線が  $T/2$  を越えるき裂長さの成長を示すことに対して ASME 曲線による計算ではそれ以前に炉の運転禁止条件に達している。これは、ASME 曲線の破壊靱性値  $K_{IC}$  が他に比べて低いと仮定したことおよび腐食疲労き裂進展速度が早いことによる。
- ii) ASME 曲線は High R および Low R の Stage I の段階が無いのに対して、Low S 曲線あるいは Medium S 曲線は High R および Low R とともに、Stage I が寿命全体に占める割合が大きい。
- iii) Low S 材と Medium S 材の間では、大きな寿命に対する差異が認められないが、これは、 $da/dN-\Delta K$  曲線を仮定した (図 3 および 4 参照) 時の、この Stage I, II および III の各段階の特に Stage I から II, II から III に変化する比較的低  $\Delta K$  領域のデータが不十分であり、これを前述した仮定で  $da/dN-\Delta K$  曲線を暫定的に決め、寿命評価計算に使用したためであり、このことは逆説的に、この領域での  $da/dN-\Delta K$  データを精度よく知ることが寿命予測上重要なことを示している。

## 4 討 論 , 考 察

前章までに寿命予測計算の暫定的な入力データ値を用いて各入力因子についてその寿命に及ぼす効果について検討し、さらに ASME Code における参照き裂進展速度データ  $da/dN-\Delta K$  と国産の初期および最近製造されている材料に相当する材料データを仮定して、3 者の比較をおこなった。その結果として、国産材について ASME Code の参照  $da/dN-\Delta K$  曲線で寿命評価を検討することがいかに現実的でないかをうかがい知ることができた。しかしながら、これらの結果はいずれも暫定的な仮定を採り入れた計算であるため、得られた結果そのものの数値は大きな意味を持たないことを強調したい。それは以下に述べるいくつかの寿命評価上の

課題および材料試験データ上の課題があるためであり、それに伴ってある部分では非現実的な計算結果を得ている可能性があるからである。以下に、寿命評価計算上の課題および材料試験上の課題について検討する。

#### 4.1 寿命予測評価からみた課題

##### 1) 実機の荷重スペクトラム

本寿命予測プログラム RPVLE-I では荷重スペクトラムは非常に単純な応力波形を使用した。実機の応力波形はさらに複雑であろうことは容易に推測される。それは、場所による違いや、時間依存による違いなど複合的に合成される応力による。しかし、予測はかならずしも現実とまったく一致する波形が必要であるものとは思われない。特に、ここで寿命評価した結果が安全側の評価結果でかつ、現実離れでない結果を導き出しているかいないかが問題である。中でも波形の相互干渉によるき裂の加速あるいは停滞あるいは減速効果の有無に注目する必要がある。

##### 2) 実機の環境条件の変化

冷却水の水化学の変化、中でも表面き裂中の水化学は著しくき裂の成長速度を左右する効果がある。そのため、対象となる水化学の特徴付けが必要で、実機中を大流速でもって流れている冷却水の水質とき裂端部の水質の差についてのきめの細かいクラス分類が可能となる方向での検討が必要となる。

##### 3) 予測される欠陥位置

欠陥の存在する可能性の高い位置としては大きく分け、①圧力容器の胴部、②圧力容器と配管のノズルコーナ部および③胴部と鏡部の接続部などを挙げることができる。これらはそれぞれ、①溶接部では材質的に不均一であったり、溶接時の欠陥が入りやすいこと、②冷却水の戻り水は温度が低く、熱応力の発生源となったり、事故時を想定した場合には過大な異常荷重が作用しやすいこと、また③構造不連続部でありかつ溶接構造部分を伴い、力学的な応力集中の可能性が大きいなどの理由による。これら考えられる欠陥の位置にもとづいて、き裂の方向、材質（母材か、溶接部か、熱影響部かなど）によって、寿命評価へ導入するデータも異ってくることはもちろんであるが、さらなき裂深さの非破壊検査による同定の難易に関しても重要となる。図13でも示したようにき裂の非破壊試験による検出限界は10mm以下となる必要があり、非破壊検査の検出限界が総合的に見た圧力容器の破壊防止に対する信頼性の軽重に大きく影響を与える要因を含んでいる。

##### 4) 想定破壊条件について

事故時を想定した破壊条件については、本寿命評価においては静的な破壊を考えて破壊靱性値  $K_{IC}$  を用いて評価をおこなったが、破損に際しては当然他の因子、例えば変形速度、温度あるいは温度変化速度、外部応力の種類などを前述した想定欠陥位置との関係を十分に考慮し検討することが必要となる。

以上、寿命評価プログラムの改良に対して、今後検討すべき課題について触れたが、最終的

には圧力容器全体の信頼性を議論する必要がある、そのためにはLBB後のき裂開口速度と関係した冷却水のリーク速度などの検討に資するデータの取扱いあるいは圧力容器に接続した配管との相互関係などについても検討の対象として含めていく必要性が生じるであろう。

## 4.2 材料試験上の課題

軽水炉圧力容器の寿命予測の簡単な試計算をおこなった結果、試験片を主体的に取扱った材料試験において、今後重点的に進めるべき課題について以下に述べる。

### 1) 表面き裂の成長挙動

表面き裂の成長挙動については、実機におけるノズルコーナ部のき裂を除けば、ほぼこの形態の欠陥成長挙動となる。ここで特に、大気中の試験とは著しく異って欠陥内部の水化学環境について不明な点が多い。現在、流量あるいは流速の効果がき裂先端の水化学との関係から注目されている。低流速→高き裂進展速度、一方、高流速→低き裂進展速度の図式からすると表面欠陥の先端部は早いき裂進展挙動を示すが、表面の開口部付近は遅いき裂進展挙動を示す。このような形態は本論で前提とした、アスペクト比一定の相似的き裂成長挙動とは大きく異って、アスペクト比 $A/L$ はき裂進展に伴って増加することとなる。しかし、 $A/L$ が大きくなると同じき裂長さ $A$ に対しては力学的に応力拡大係数は小さくなり、図8で見たように、総体的なき裂成長は遅くなる。結局のところ、現行のCT型試験片で得られる情報とは大いに異ったものとなることは予想されるが、表面欠陥を取扱った試験を高温・高圧水中下で実施し、ここで指摘した事項について確認することが何よりもまして重要となる。そのためには装置類が既設の設備とは比較にならない程大型なものになることは避けられない。

### 2) $\Delta K_{th}$ の有無および取扱い

図3および図4に示したように、大気中き裂進展曲線と高温高圧水中き裂進展曲線とが交差あるいは合流する付近での $\Delta K$ 領域以下における $R=0.2$ および $R=0.7$ の $da/dN-\Delta K$ データとともに、 $\Delta K_{th}$ が存在するかいなか、存在するとすればその値はどれほどであるか、第2章の寿命計算においては $\Delta K$ の値としては $R=0.2$ の場合には $10\sim 50 MP_a \sqrt{m}$ 、 $R=0.7$ の場合には $3\sim 10 MP_a \sqrt{m}$ の $da/dN-\Delta K$ データが多く使用された。もしも、これらの $\Delta K$ の領域に $da/dN-\Delta K$ の $\Delta K_{th}$ が存在すると、それ以下の $\Delta K$ 域では繰り返しによって、すなわち、腐食疲労によってき裂は成長しないことになる。この点からすれば、 $\Delta K_{th}$ の存在は圧力容器の寿命を評価する上で非常に重要であることが知られるが、試験に長時間を要することなどの制約によって未着手となっている。

### 3) High R比データの不足

High R比データは原子炉の通常運転時における荷重状態でのき裂挙動評価とつながるものであることは前述したとおりである。そのため、Low R データに比べて、その繰り返し回数は1ブロック当り $10^3\sim 10^4$ 倍程度となり、その時の $\Delta K$ は比較的低くてもき裂成長は大きい

ことが予想される。さらに、繰り返しによるき裂成長のみならず、SCC（応力腐食割れ）現象によってもき裂は成長することが予想される。これらのことを考慮してもHigh Rのデータがいかに圧力容器の寿命に大きく影響を与えるかが計り知られる。一方、 $K_{Isc}$ の簡便な方法として、CT型試験片を用いたBolt Loadingによる試験もあるが、応力因子、特にK値との関連において不十分な点がある。

いずれにしても現実的にはこの種のデータ蓄積はきわめて乏しい。その主な理由は

- i) 使用する試験片サイズが力学的な要求から比較的大型となるため、その結果として、装置が大型化となり高価となる。
- ii)  $\Delta K$ が小さいためにき裂のモニタ特に従来より一般的に実施されているコンプライアンス法では精度よく測定することが難しくなる。
- iii) 実験そのものの難度も増加する。

などを挙げるができる。

#### 4) き裂モニタリング方法の開発

すでに述べたように、高温高圧水中でのき裂進展の課題からすると、き裂そのものの挙動を十分に知る必要があるであり、そのためにはき裂長さを精度よく測定することが必要となる。この種の試験では従来より除荷コンプライアンス法を用いることが多い。しかしながら、これからは是非必要となるデータは実験上は比較的き裂開口量が少ない場合が多く、おのずとコンプライアンスの精度は著しく低下するかあるいは測定不能となる。そのため新しい概念のき裂モニタを必要とする。著者は従来からこの点を考慮し、高温高圧水中で使用可能なき裂モニタ法として、電位差法、中でも直流交番電位差法の開発、改良を進めているが<sup>7)</sup>、この方法は今後さらに要求が増すものと思われる。

#### 5) そ の 他

その他の課題としては、き裂開閉口の問題と高温高圧水中での水化学の測定技術の改良などが挙げられる。すなわち、試験条件と実機の水化学条件の比較検討が正しい寿命評価に当て欠せないものであるからである。

## 5 ま と め

圧力容器の寿命予測用の基本的計算プログラムRPVLE-Iを作成し、著者が得た材料データや多くの仮定に基づく暫定的データを使って圧力容器の寿命予測の試算をおこない、次のような結論を得た。

- 1) 定常状態においては応力、High Rにおける繰り返し数、仮想的な事故時においては応力が圧力容器の寿命に大きく影響する。
- 2) 中性子照射の影響は、仮想的事故時の破損モードを延性破壊であると仮定すると、ほとん

ことが予想される。さらに、繰返しによるき裂成長のみならず、SCC（応力腐食割れ）現象によってもき裂は成長することが予想される。これらのことを考慮してもHigh Rのデータがいかに圧力容器の寿命に大きく影響を与えるかが計り知られる。一方、 $K_{Isc}$ の簡便な方法として、CT型試験片を用いたBolt Loadingによる試験もあるが、応力因子、特にK値との関連において不十分な点がある。

いずれにしても現実的にはこの種のデータ蓄積はきわめて乏しい。その主な理由は

- i) 使用する試験片サイズが力学的な要求から比較的大型となるため、その結果として、装置が大型化となり高価となる。
- ii)  $\Delta K$ が小さいためにき裂のモニタ特に従来より一般的に実施されているコンプライアンス法では精度よく測定することが難しくなる。
- iii) 実験そのものの難度も増加する。

などを挙げるができる。

#### 4) き裂モニタリング方法の開発

すでに述べたように、高温高圧水中でのき裂進展の課題からすると、き裂そのものの挙動を十分に知ることが必要であり、そのためにはき裂長さを精度よく測定することが必要となる。この種の試験では従来より除荷コンプライアンス法を用いることが多い。しかしながら、これからは是非必要となるデータは実験上は比較的き裂開口量が少ない場合が多く、おのずとコンプライアンスの精度は著しく低下するかあるいは測定不能となる。そのため新しい概念のき裂モニタを必要とする。著者は従来からこの点を考慮し、高温高圧水中で使用可能なき裂モニタ法として、電位差法、中でも直流交番電位差法の開発、改良を進めているが<sup>7)</sup>、この方法は今後さらに要求が増すものと思われる。

#### 5) そ の 他

その他の課題としては、き裂開閉口の問題と高温高圧水中での水化学の測定技術の改良などが挙げられる。すなわち、試験条件と実機の水化学条件の比較検討が正しい寿命評価に当て欠せないものであるからである。

## 5. ま と め

圧力容器の寿命予測用の基本的計算プログラムRPVLE-Iを作成し、著者が得た材料データや多くの仮定に基づく暫定的データを使って圧力容器の寿命予測の試算をおこない、次のような結論を得た。

- 1) 定常状態においては応力、High Rにおける繰返し数、仮想的な事故時においては応力が圧力容器の寿命に大きく影響する。
- 2) 中性子照射の影響は、仮想的事故時の破損モードを延性破壊であると仮定すると、ほとん



ど圧力容器の寿命に影響を与えない。

- 3) 非破壊検査の検出限界は破壊靱性値やき裂進展速度などとの組合せによって決める必要がある。
- 4) 初期の破壊靱性値 $K_{IC}$ は最低でも $300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$ であることが望しい。
- 5) 今後、実機の応力変動(複合波形効果を含む)、水化学変化などの把握が重要となるとともに、表面き裂問題のように実機を模擬した試験の必要性が明らかとなった。
- 6)  $\Delta K_{th}$ あるいは $K_{ISCC}$ データなど比較的材料試験の困難なデータ蓄積の必要性が明らかとなった。
- 7) 新たな技術検討課題として、高温高压水中下でのき裂モニタ、き裂開閉口および水化学分析等を挙げることができ、これらについて新たな展開が必要である。

終りに本研究に対して、御助言を頂いた、安全解析部リスク評価解析室の宇賀 丈雄主任研究員にこの紙面を借りて感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI
- 3) Theodore V. Marstor : Flaw Evaluation Procedures , EPRI NP-719-SR (1978)
- 4) J. R. Hawthorne : IAEA Specialists' meeting , Vienna , Austria , (1981)
- 5) J. M. Barsom , S. T. Rolfe : ASTM STP 466 (1970)
- 6) G. Nagel : Surveillance Irradiations and Reactor Pressure Vessel Safety , IAEA meeting , (1979)
- 7) 中島伸也, 菊池正明, 嶋誠之: "電位差法によるき裂伝播の自動計測化" , JAERI-M 82-149 (1982)

ど圧力容器の寿命に影響を与えない。

- 3) 非破壊検査の検出限界は破壊靱性値やき裂進展速度などとの組合せによって決める必要がある。
- 4) 初期の破壊靱性値 $K_{IC}$ は最低でも $300 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$ であることが望しい。
- 5) 今後、実機の応力変動(複合波形効果を含む)、水化学変化などの把握が重要となるとともに、表面き裂問題のように実機を模擬した試験の必要性が明らかとなった。
- 6)  $\Delta K_{th}$ あるいは $K_{ISCC}$ データなど比較的材料試験の困難なデータ蓄積の必要性が明らかとなった。
- 7) 新たな技術検討課題として、高温高圧水中下でのき裂モニタ、き裂開閉口および水化学分析等を挙げることができ、これらについて新たな展開が必要である。

終りに本研究に対して、御助言を頂いた、安全解析部リスク評価解析室の宇賀 丈雄主任研究員にこの紙面を借りて感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI
- 3) Theodore V. Marstor : Flaw Evaluation Procedures , EPRI NP -719-SR  
(1978)
- 4) J. R. Hawthorne : IAEA Specialists' meeting , Vienna , Austria ,  
(1981)
- 5) J. M. Barsom , S. T. Rolfe : ASTM STP 466 (1970)
- 6) G. Nagel : Surveillance Irradiations and Reactor Pressure Vessel Safety ,  
IAEA meeting , (1979)
- 7) 中島伸也, 菊池正明, 嶋誠之 : “ 電位差法によるき裂伝播の自動計測化 ” , JAERI-M  
82-149 (1982)

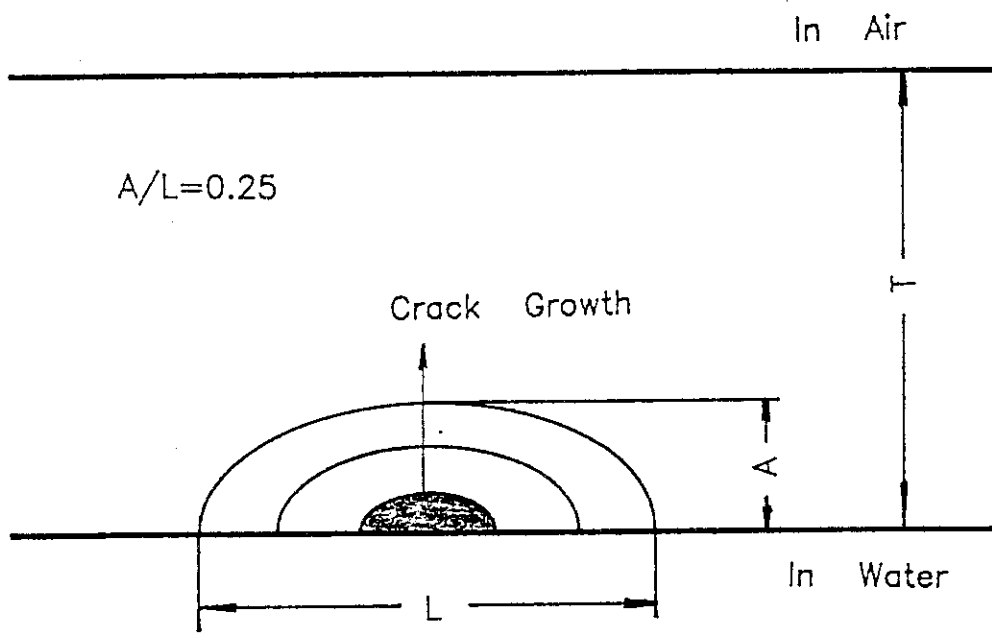


図1 表面き裂進展の形状とアスペクト比  $A/L$   
( $A/L = 0.25$ の場合)

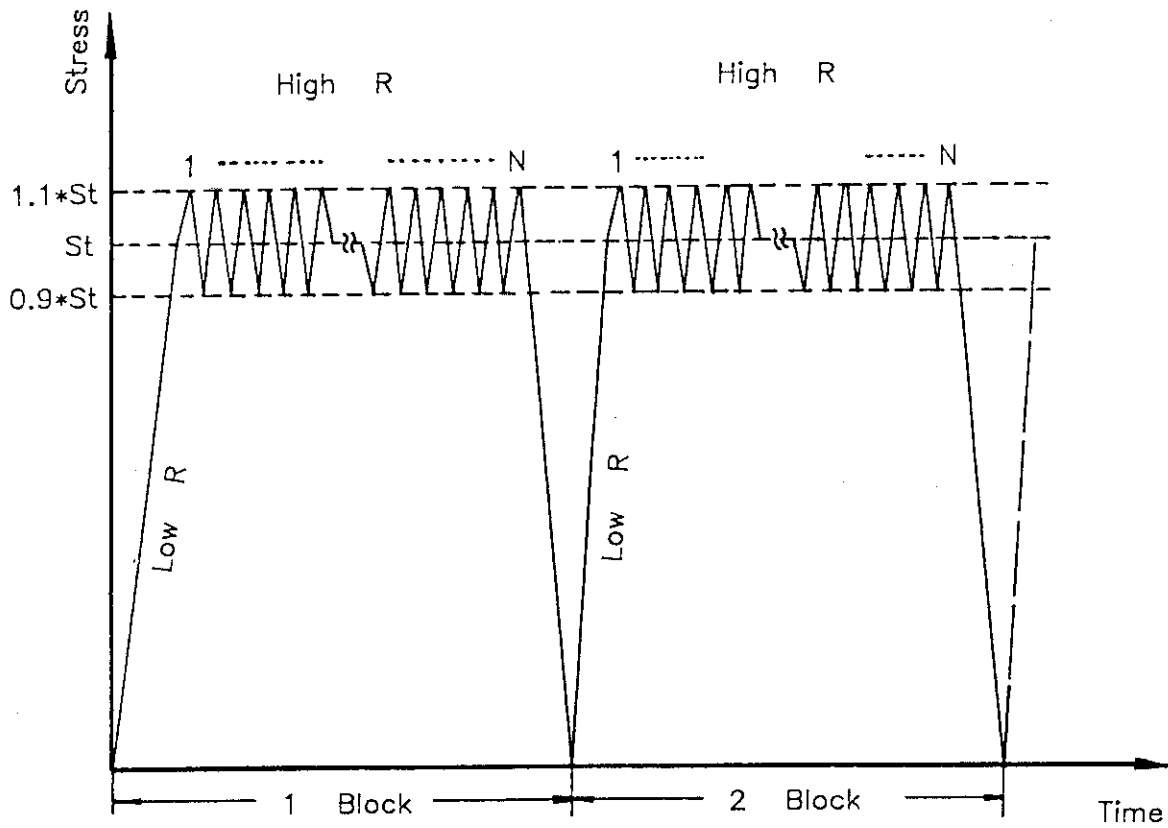


図2 RPVLE-I で使用した運転時間に対する応力変化の概念図

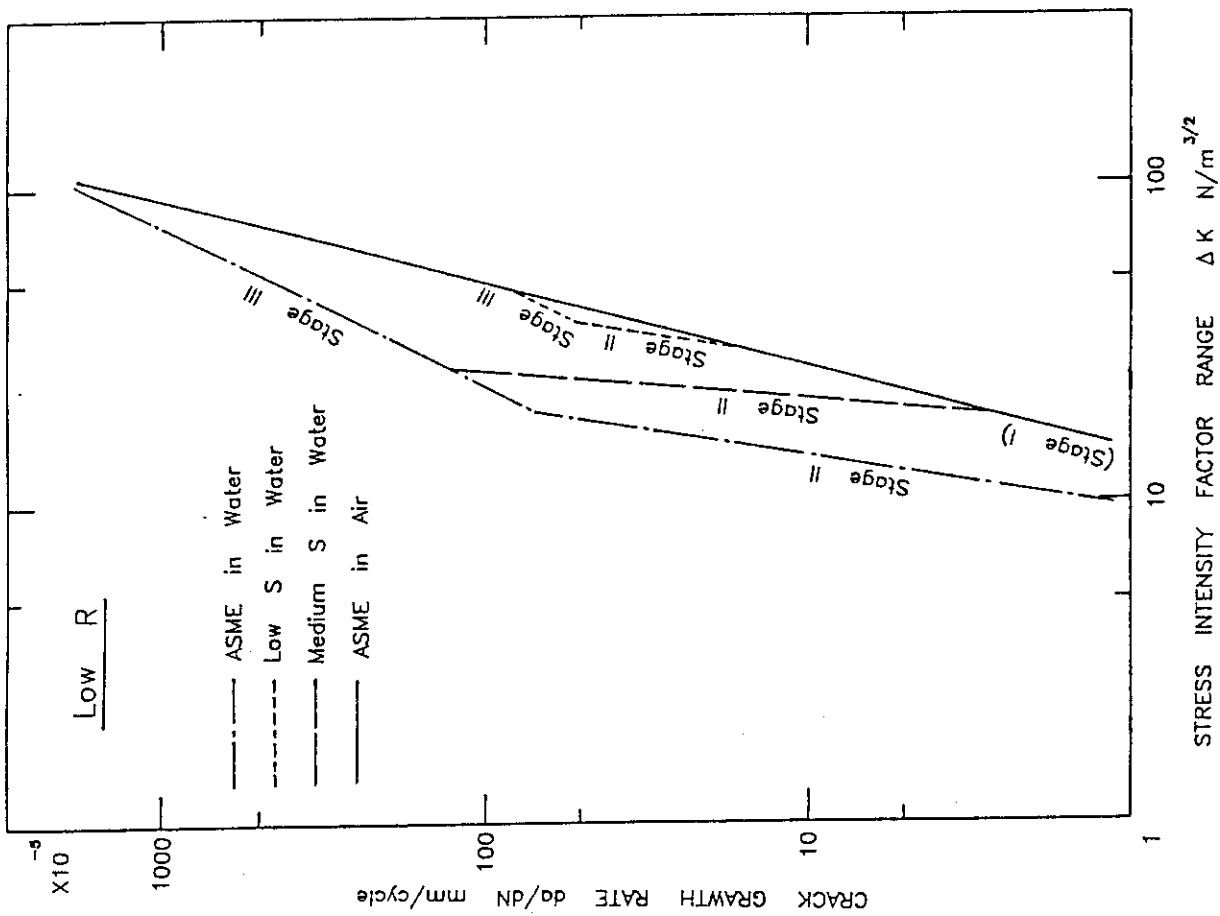


図3 R P V L E - I プログラムで使用したとき進展速度 da/dN の A S M E, Low S 材, Medium S 材と大気中データ曲線を示す。(Low R の場合)

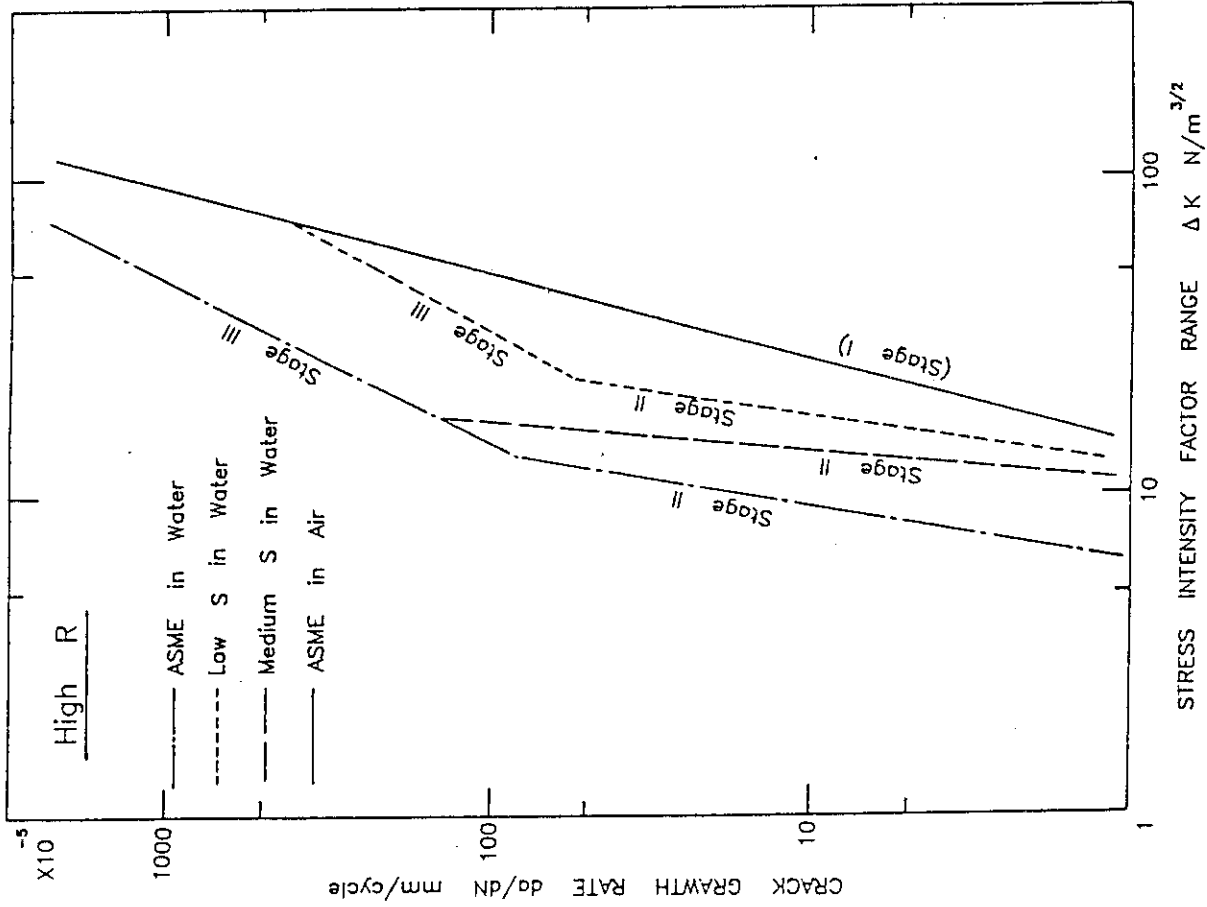


図4 R P V L E - I で使用したとき進展速度 da/dN の A S M E, Low S 材, Medium S 材と大気中データ曲線を示す。(High R の場合)

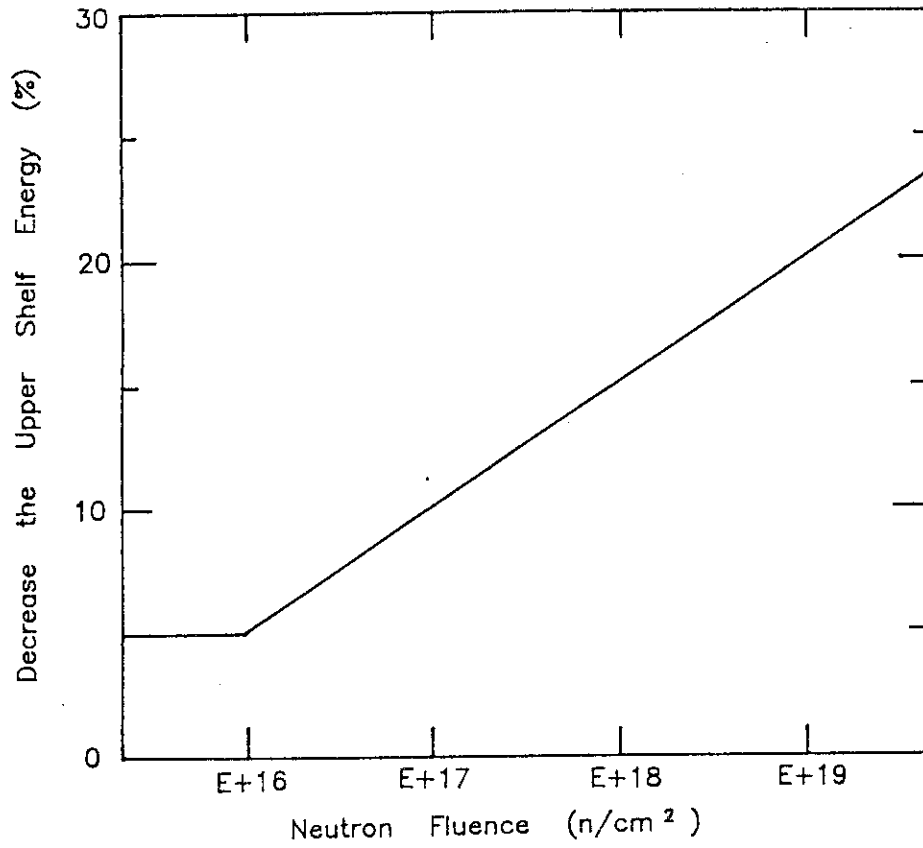


図5 中性子照射量に対するシャルピ上部棚エネルギーの低下率の変化

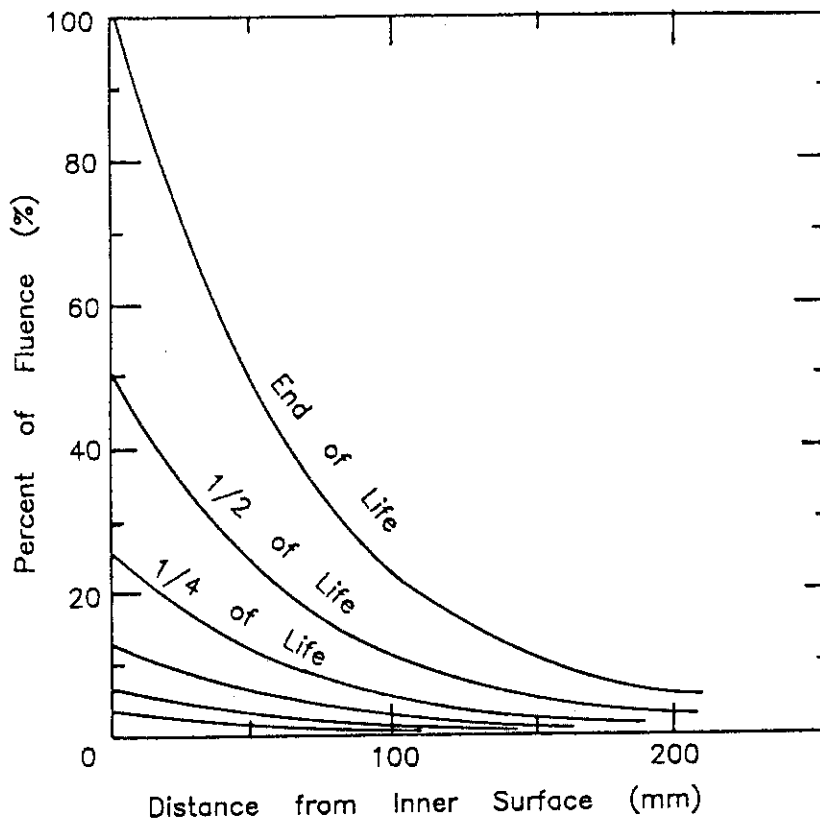


図6 中性子照射量の内表面から外表面にわたっての変化

0: Input Data (A/L, n/B, St-n, St-f, N/B, Sy, ΔAH Af, Kic)

I: Crack Length (As or Ao)  
New Block Start

II:  $K_{NL} = F(A_o, St-L)$

III: Crack Growth at Low R  
;  $\Delta A_L$  ( $A_L = A_o + \Delta A_L$ )

IV:  $K_{NH} = F(A_H, St-H)$  ; ( $A_H = A_L + \Delta A_H / 2$ )

V:  $\Delta N = N(K_{NH})$  ; ( $\sum \Delta N$ )

VI:  $K_F = F(A_H, St-f)$   
 $K_C = K(n)$

VII:  $K_F < K_C$  (Reactor Stop)  
YES (Reactor Operation Cont.)  
NO (Reactor Stop)  
Result Data Output (A, Block)

VIII:  $\sum \Delta N > N$   
YES Go to I  
NO Go to IV

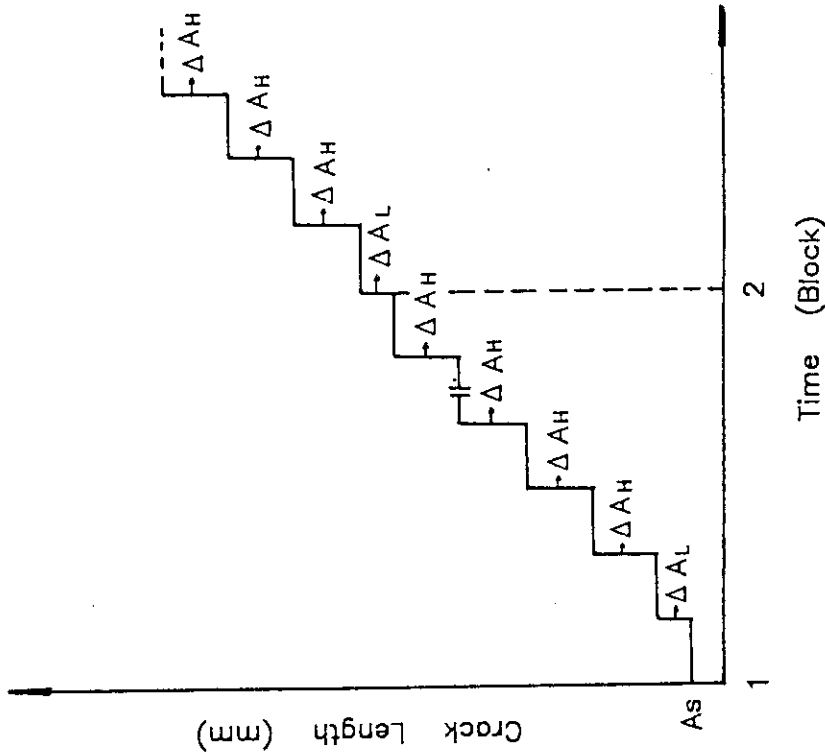


図7 RPVLE-Iプログラムの流れ図と概念図

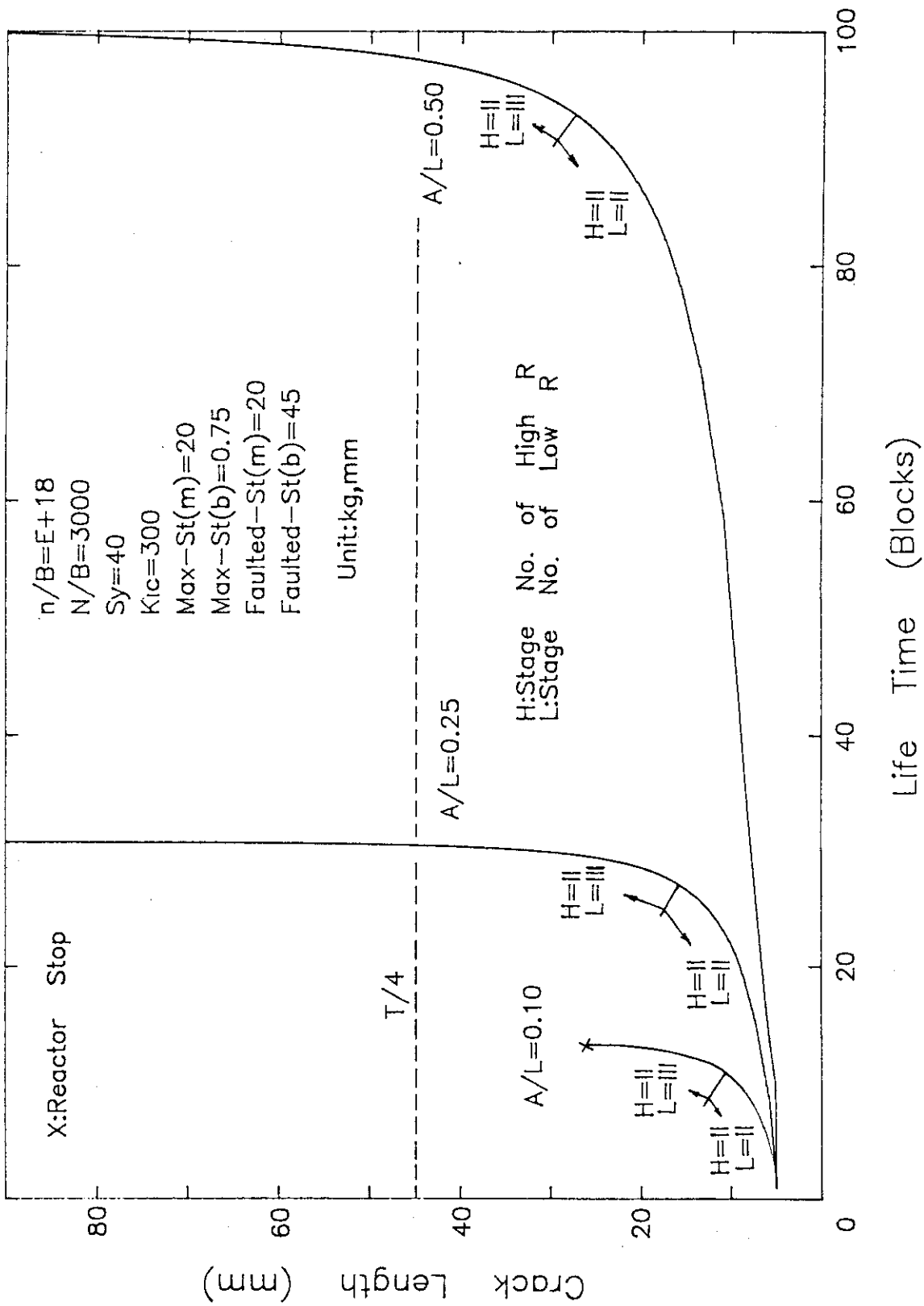


図8 ASME曲線を使用したアスペクト比A/Lのき裂進展挙動の比較

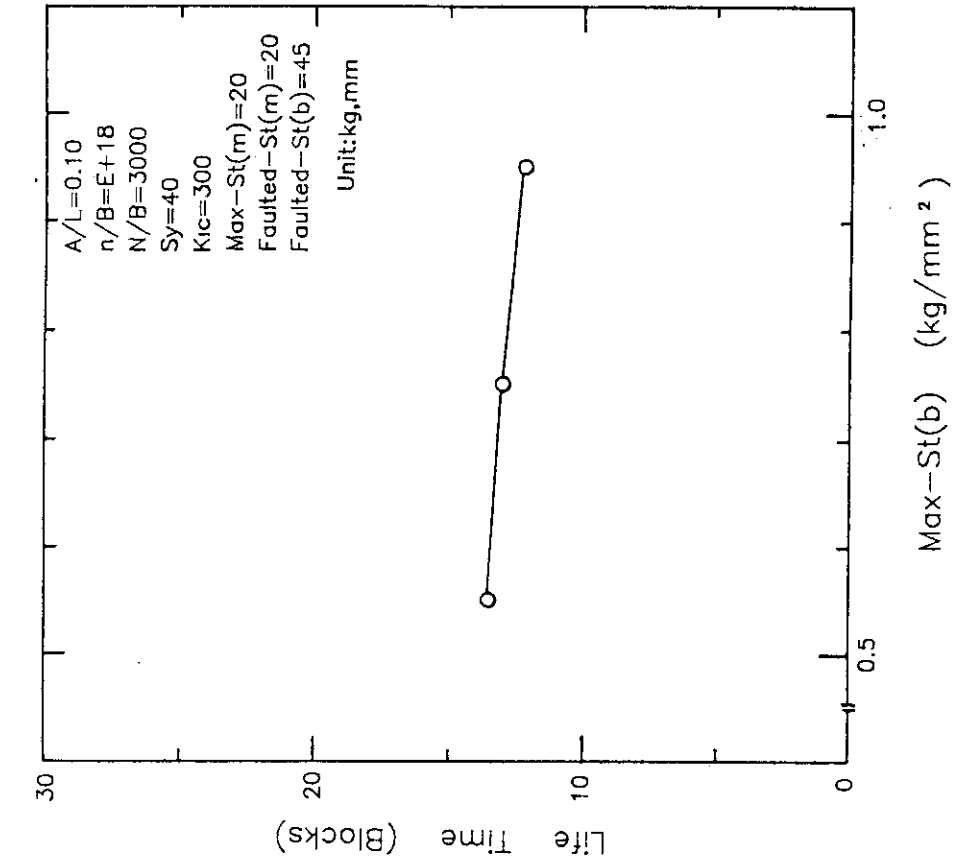


図 9 - 2 定常運転時の曲げ応力に対する寿命の関係 (A S M E 曲線の場合)

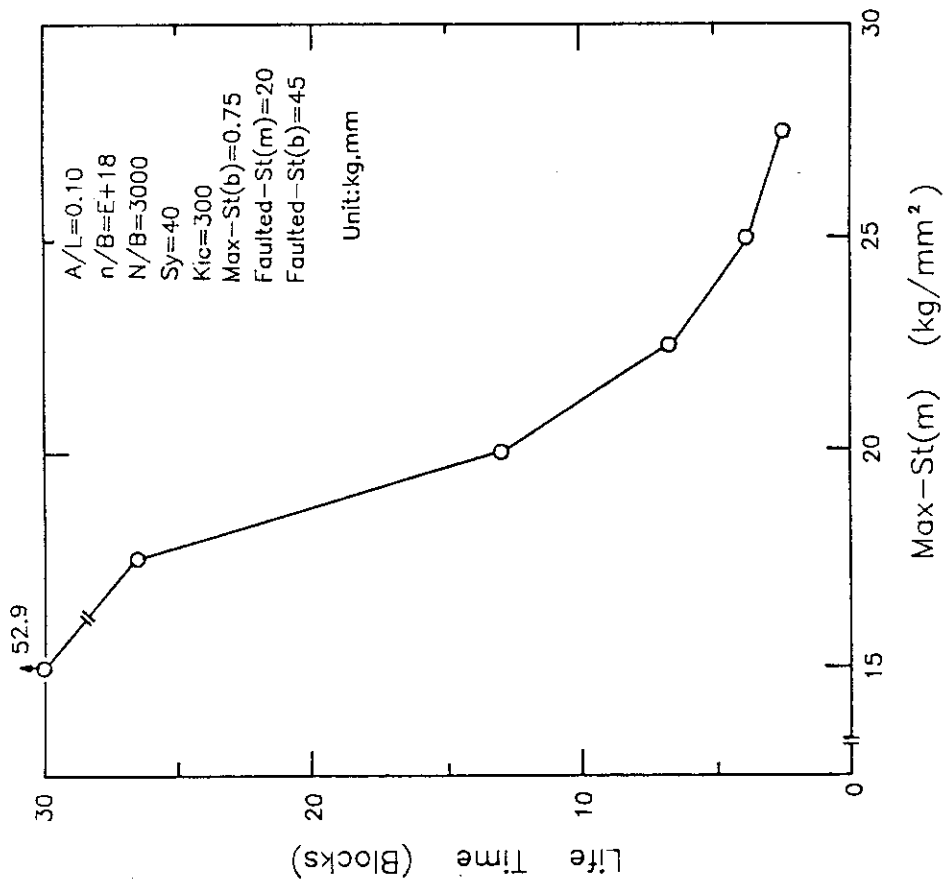


図 9 - 1 定常運転時の膜応力に対する寿命の関係 (A S M E 曲線の場合)



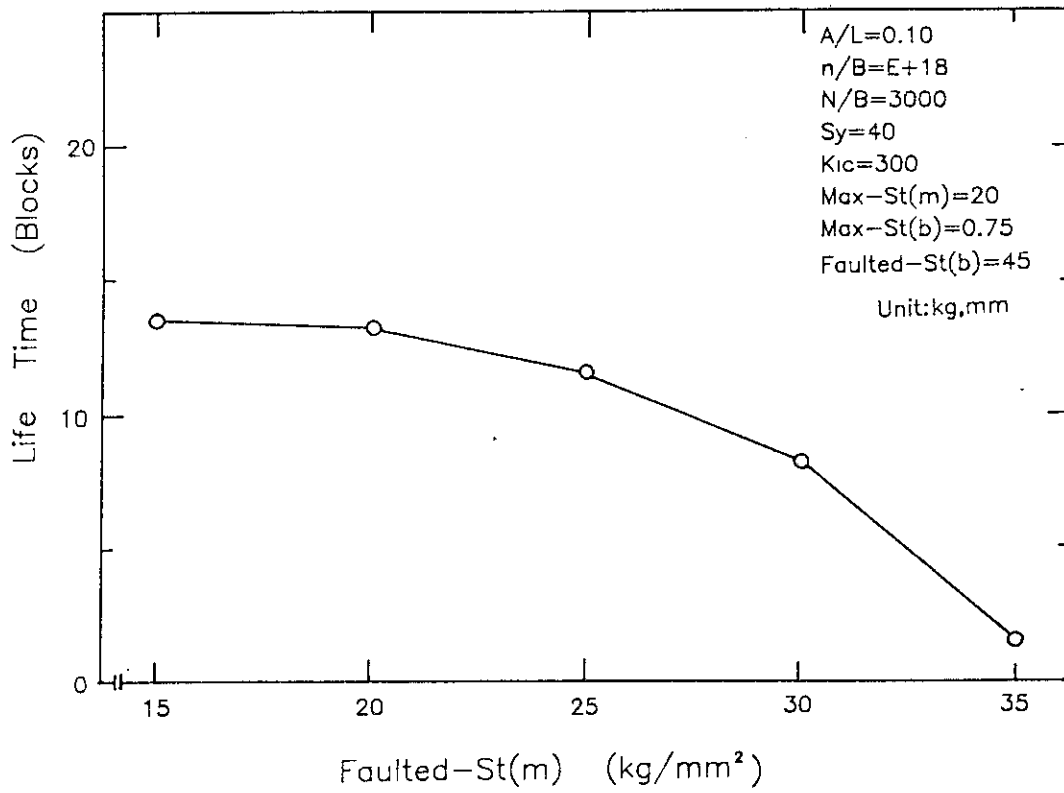


図10-1 破壊状態における膜応力に対する寿命の関係 (A S M E 曲線の場合)

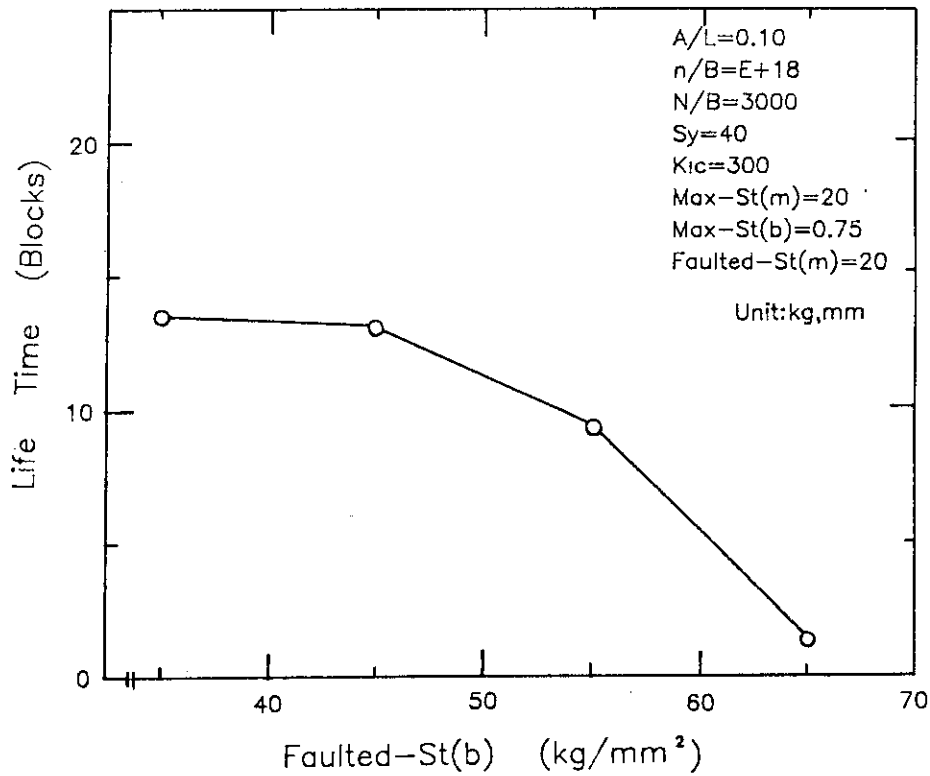


図10-2 破壊状態における曲げ応力に対する寿命の関係 (A S M E 曲線の場合)

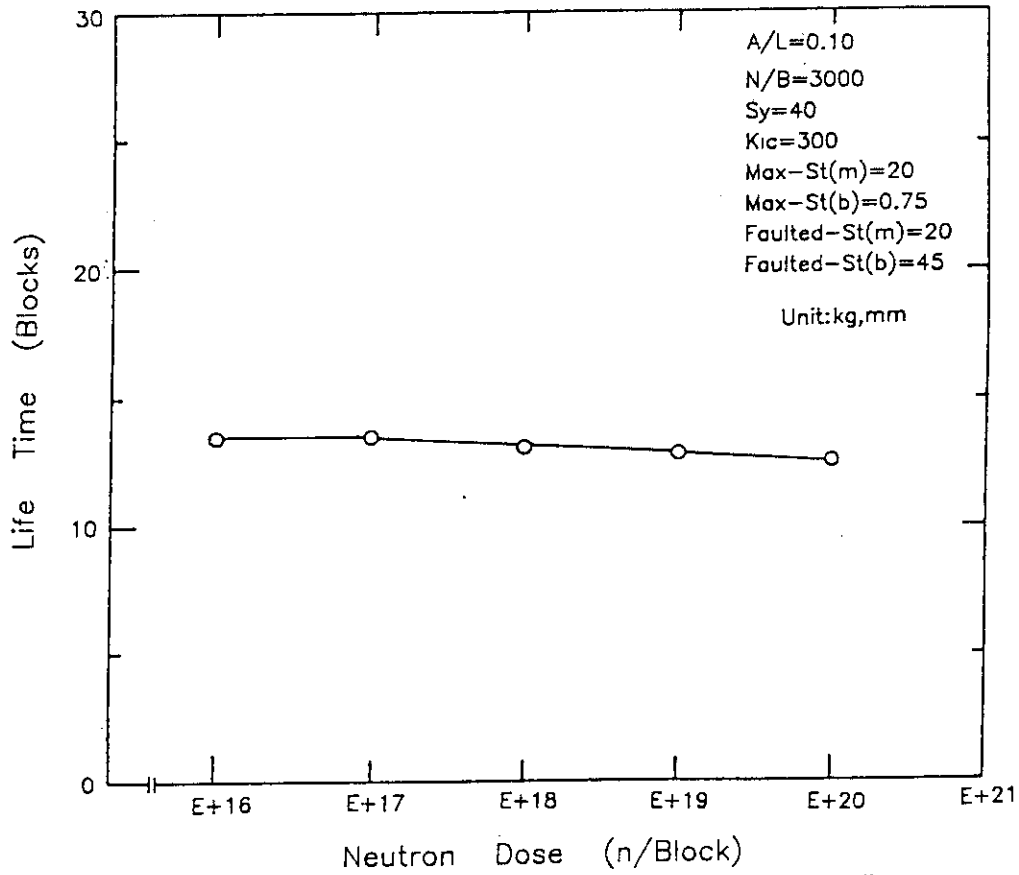


図11 単位Blockの中性子照射量に対する寿命の変化 (A S M E曲線の場合)

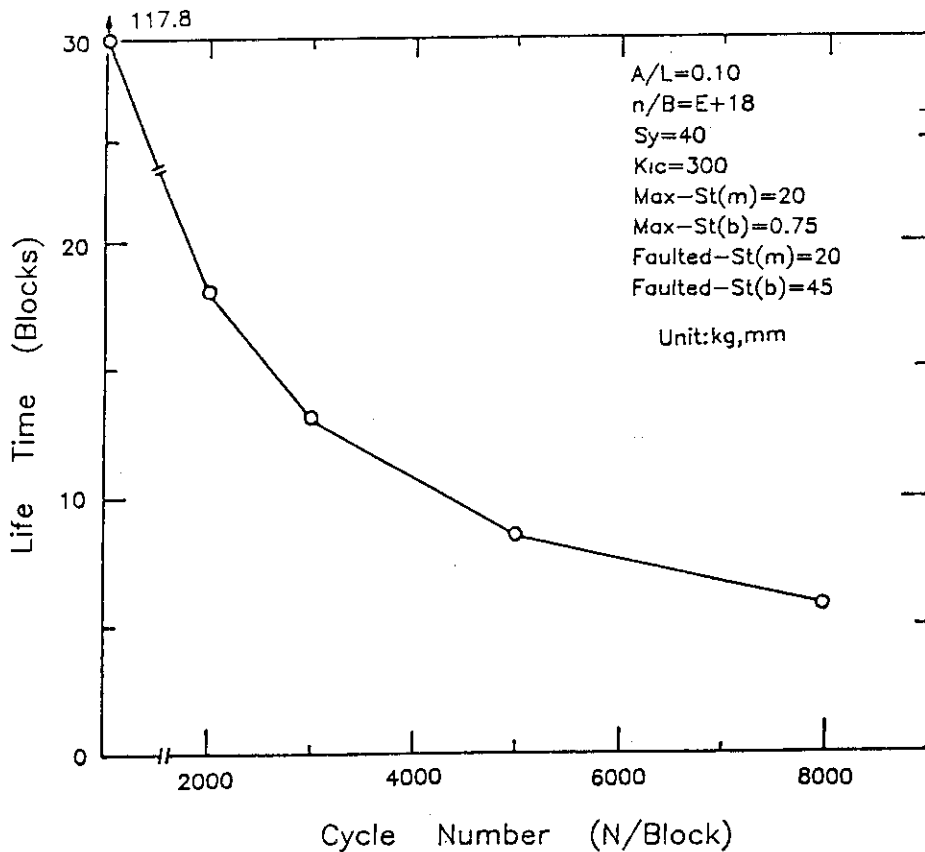


図12 High Rにおける単位Block当りのくり返し数に対する寿命変化 (A S M E曲線の場合)

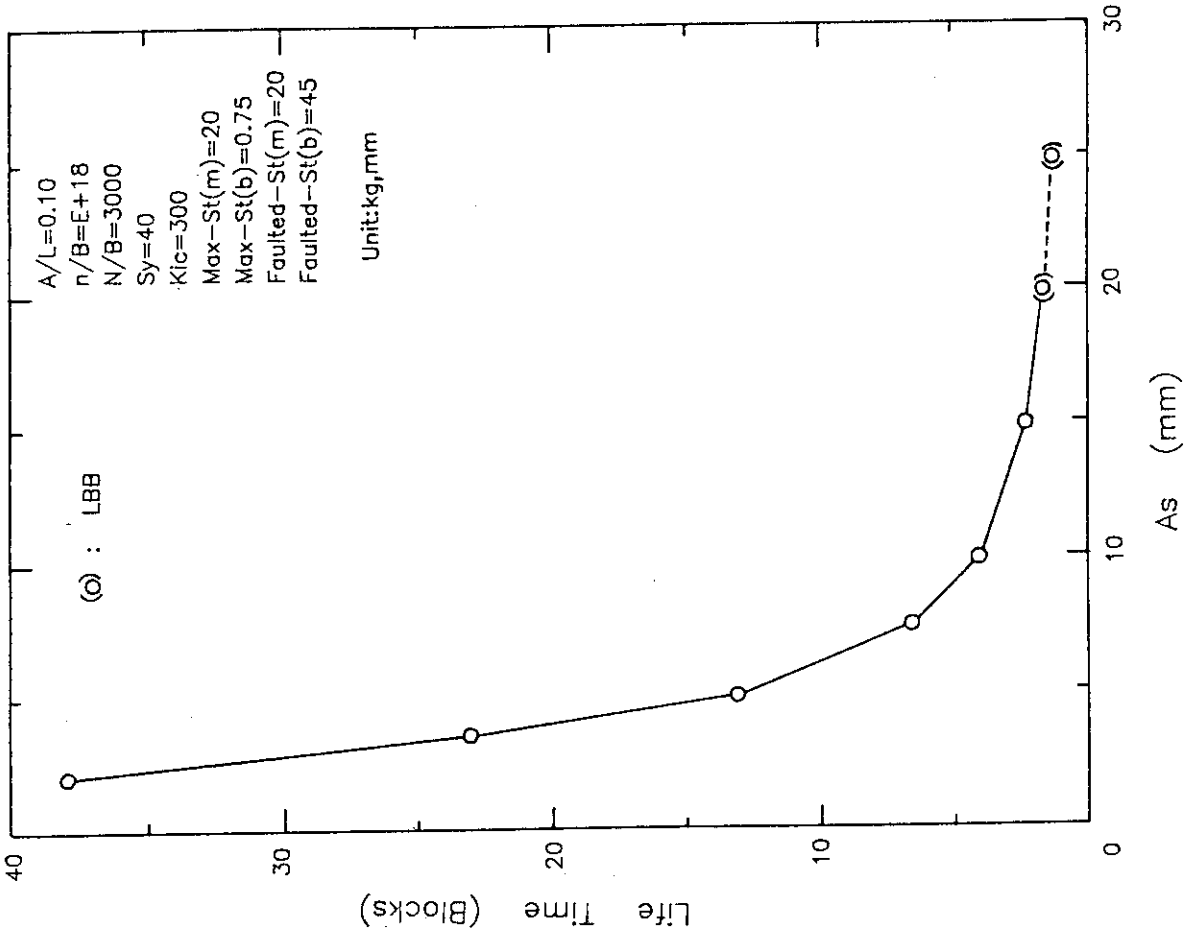


図13 A S M E 曲線を用いた時の初期き裂長さ  $A_s$  と寿命 (Block) の関係

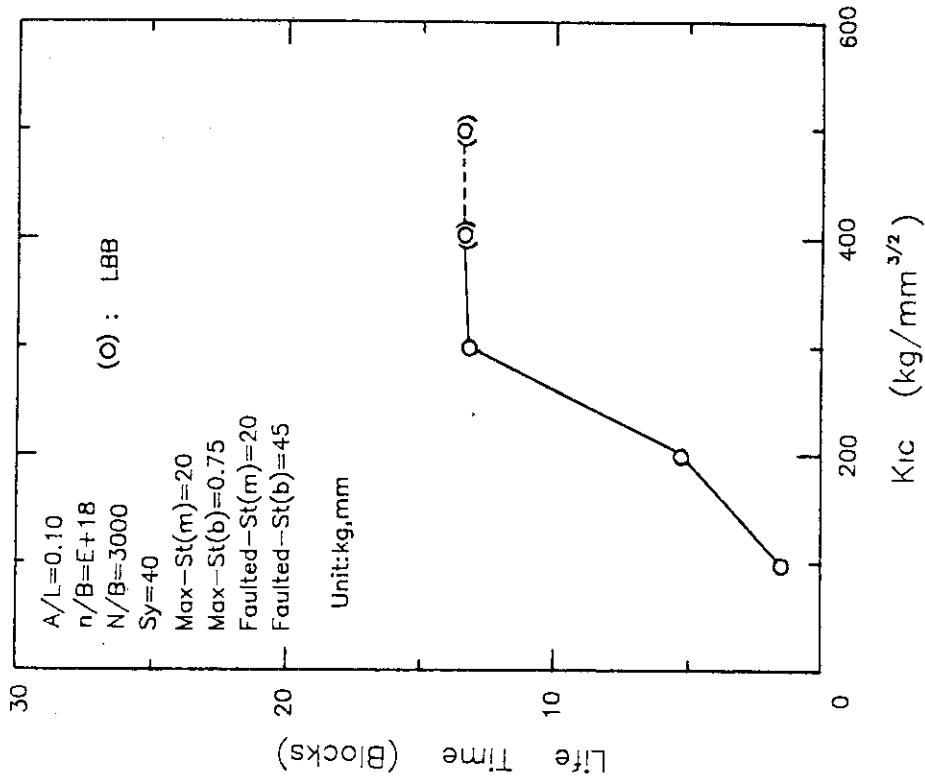


図14 初期破壊靱性値  $K_{1c}$  と寿命の関係 (A S M E 曲線の 場合)

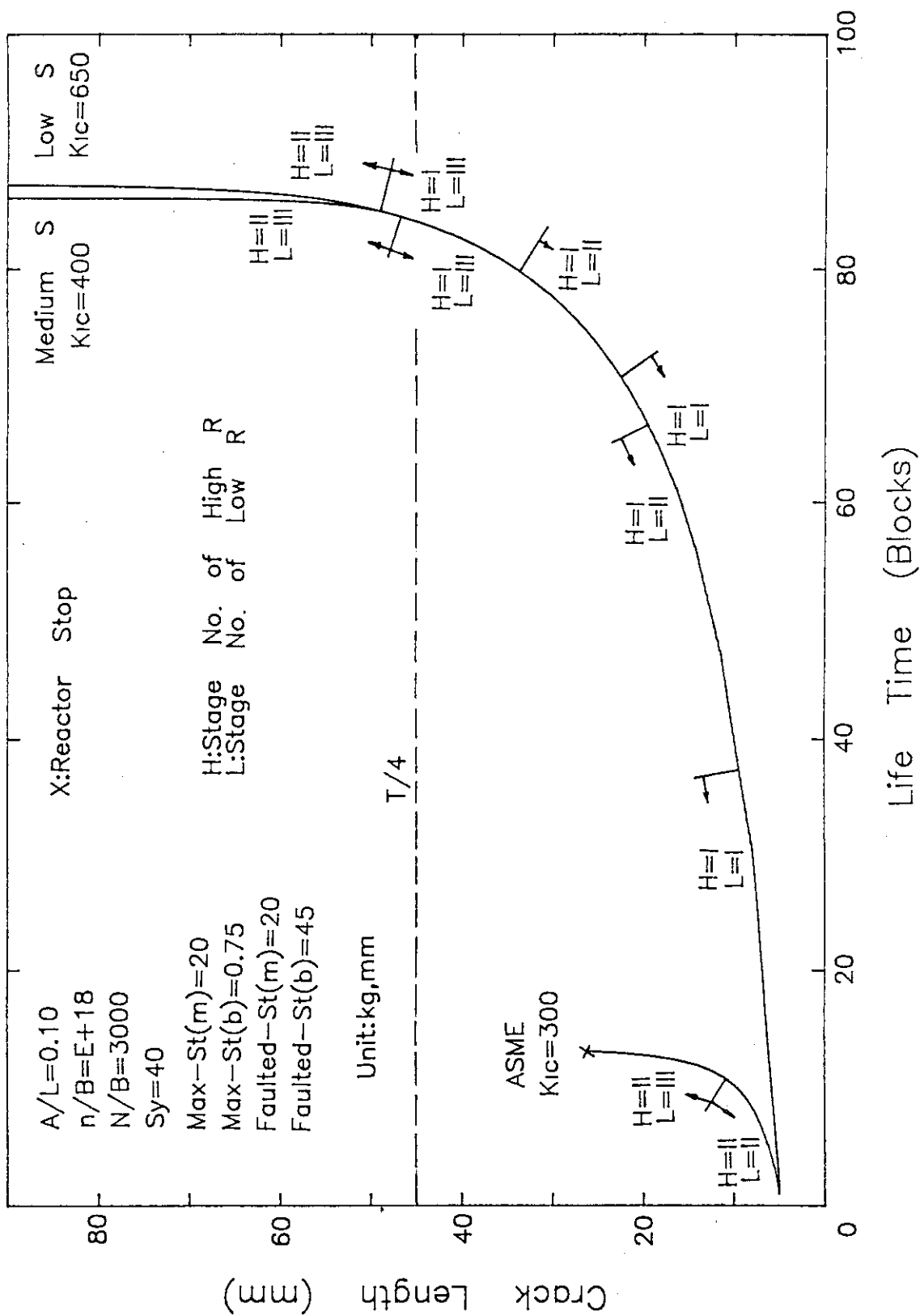


図15 ASME, Low S材, および Medium S材の寿命比較