

JAERI-Data/Code  
2001-011



JP0150350



確率論的破壊力学コードPASCAL  
の開発と使用手引き

2001年3月

柴田 勝之・鬼沢 邦雄・李 銀生\*・加藤 大輔\*

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

本レポートは、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。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

---

編集兼発行 日本原子力研究所

## 確率論的破壊力学コード PASCAL の開発と使用手引き

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部

柴田 勝之・鬼沢 邦雄・李 銀生\*・加藤 大輔\*

(2001年1月31日受理)

軽水炉構造機器の健全性に関する研究の一環として、平成8年度から確率論的破壊力学コード PASCAL( PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR) の開発を行っている。このコードは、原子炉圧力容器に加圧熱衝撃( PTS: Pressurized Thermal Shock) 等の過渡荷重が発生した場合の破損確率を解析するコードである。破壊力学の最新の知見や計算機性能の向上を踏まえ、新規解析法や詳細解析法の導入により解析精度と信頼性向上を図ることを目標に開発を進めこれまでの進捗により PASCAL-Version 1 開発を概ね完了している。本コードは、自動階層別モンテカルロ法、弾塑性破壊評価基準、半楕円亀裂の詳細進展評価機能、焼鈍効果の評価機能等に改良モデル等を導入していることが特徴である。また、温度・応力分布作成用の専用入力データプロセッサも用意している。これまでに当初計画した解析機能を整備を完了するとともに、機能の検証及び種々の影響パラメータに関するケーススタディを行い、コードとが良好に作動することを確認している。さらに、導入した機能を用いたケーススタディにより、破損確率に及ぼす種々のパラメータの影響について検討している。本報告書は、上記開発経過を踏まえ PASCAL の使用方法と解析理論及び手法等をまとめたものである。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* (株) 富士総合研究所

## **Development of Probabilistic Fracture Mechanics Code PASCAL and User's Manual**

**Katsuyuki SHIBATA, Kunio ONIZAWA Yinsheng LI\* and Daisuke KATO\***

**Department of Reactor Safety Research  
Nuclear Safety Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

**(Received January 31, 2001)**

As a part of the aging and structural integrity research for LWR components, a new PFM (Probabilistic Fracture Mechanics) code PASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR) has been developed since FY1996. This code evaluates the failure probability of an aged reactor pressure vessel subjected to transient loading such as PTS (Pressurized Thermal Shock). The development of the code has been aimed to improve the accuracy and reliability of analysis by introducing new analysis methodologies and algorithms considering the recent development in the fracture mechanics methodologies and computer performance. The code has some new functions in optimized sampling and cell dividing procedure in stratified Monte Carlo simulation, elastic-plastic fracture criterion of R6 method, extension analysis models in semi-elliptical crack, evaluation of effect of thermal annealing and etc. In addition, an input data generator of temperature and stress distribution time histories was also prepared in the code .

Functions and performance of the code have been confirmed based on the verification analyses and some case studies on the influence parameters. The present phase of the development will be completed in FY2000. Thus this report provides the user's manual and theoretical background of the code.

Key words: Probabilistic Fracture Mechanics, Reactor Pressure Vessel, Pressurized Thermal Shock, Structural Integrity, Failure Probability, R6 Method, Warm Pre-Stress, Thermal Annealing, Overlay Cladding

---

\* Fuji Research Institute Corporation :

## 目 次

1. はじめに-----	1
2. プログラムの動作環境-----	6
3. 入力方法-----	7
3.1 各カードセットの入力フォーマット及び入力内容-----	7
3.2 入力フラグと必要なカードセットとの対応-----	60
3.3 入力データ例-----	74
3.4 PASCAL の結果と VISA-II の結果の比較-----	87
4. 出力説明-----	90
4.1 入力カードのエコー出力ファイル (File number=11) -----	90
4.2 メイン出力ファイル (File number=20) -----	90
4.3 図形データ出力ファイル (File number=26) -----	91
4.4 き裂進展状況出力ファイル (File number=27) -----	92
4.5 R 6 法破壊評価曲線出力ファイル (File number=66) -----	92
4.6 決定論的解析結果出力ファイル (File number=37) -----	93
5. まとめ-----	95
参考文献-----	95
付録 1 プログラムの構成及び流れ-----	97
付録 2 基礎理論及び解析手法の解説-----	121

## Contents

1. Introduction-----	1
2. Specification of Hardware-----	6
3. Generation of Input Data-----	7
3.1 Format and Items of Input Data Set-----	7
3.2 Flag and Related Card Set-----	60
3.3 Sample Data Set-----	74
3.4 Comparison of Analysis Results between PASCAL and VISA-II-----	87
4. Output Data-----	90
4.1 Echo File of Input Data Set (File number=11)-----	90
4.2 Output File of Main Results (File number=20)-----	90
4.3 Output File for Graphic Data (File number=26)-----	91
4.4 Output File of Crack Extension Process (File number=27) -----	92
4.5 Output File of Fracture Analysis Diagram of R6 Method (File number=66) ---	92
4.6 Output File of Deterministic Analysis Results-----	93
5. Conclusions-----	95
References-----	95
Appendix 1 Construction and Flow of Program-----	97
Appendix 2 Basic Theories and Methodologies-----	121

# 1. はじめに

確率論的破壊力学 (PFM: Probabilistic Fracture Mechanics) は、構造機器に対する負荷や材料強度のばらつき、あるいは欠陥寸法分布・存在確率等を考慮して機器の信頼性や健全性を合理的に評価できる手法として注目されている。今日、安全率に基づく決定論的な評価を補強あるいはこれに代わる評価法として、手法整備やコード開発が進められており、国外では、破断前漏洩や経年圧力容器の健全性評価に関わる規制に取込まれる動向にある[1,2]。この背景から、経年機器のより合理的な健全性評価法の確立を目的に、NRC/EPRI[3]や OECD/NEA のワーキンググループ[4]による国際ベンチマーク解析が実施されている。我が国においても、規制・規格への確率論的手法の導入に備え、評価手法の整備を行っておくことが必要と思われる。

原研では、軽水炉構造機器の健全性に関する研究の一環として、経年原子炉圧力容器の健全性を評価するため、平成8年度から確率論的破壊力学コード PASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR)の開発を行っている。11年度までの研究開発により、概ね目標とする機能、性能の整備を終えており、今後は、実機への適用や一般ユーザの利用に供することが必要な段階である。そのため、本報告書は PASCAL の使用方法と理論・手法についてまとめたものである。

PASCAL は、原子炉圧力容器に加圧熱衝撃 (PTS : Pressurized Thermal shock) 等の過渡荷重が発生した場合の破損確率を解析するコードである。破壊力学の最新の知見や計算機性能の向上を踏まえ、新規解析手法や詳細解析法の導入により解析精度と信頼性向上を図ることを目標に、新規コードを開発したものである。

本解析コードの主な評価項目・評価機能の一覧を表 1.1 に示す。また、コードの全体評価流れを図 1.1 に示す。材料物性、境界条件、トランジェント時の温度・応力分布時刻歴等を入力し、次に、圧力容器胴部に想定初期き裂分布から 1 個のき裂をサンプリングする。さらに、非破壊検査によるき裂検出の可否を判定し、き裂検出できない場合は、過渡事象のある時刻におけるき裂進展開始、停止の判定をタイムステップ毎に最終時刻まで行う。この手順を多数のき裂サンプルについて繰返し、圧力容器に過渡事象が発生した場合の初期き裂からき裂が進展する確率 (き裂進展確率)、き裂停止確率及び破壊確率を得る。

圧力容器板厚方向に、中性子照射量、材料物性、温度・応力が分布するので、き裂進展解析を行うには、き裂が進展する毎にこれらを更新する必要がある。化学成分、高速中性子照射量、延性-脆性遷移温度、破壊靱性等は、正規分布として扱っている。圧力容器胴部に 1 個のき裂を仮定し、初期き裂寸法は確率分布として取扱う。

これまでに、コードの機能等の検証を終えており、また、コードを使用して半楕円亀裂の進展モデルの影響、クラッドの影響、焼鈍効果等について評価結果を得ている[5~8]。

PASCAL の主な特徴は下記の通りである。

- (1) 確率計算には、階層別モンテカルロ法及び重み付きモンテカルロ法を採用している。階層別モンテカルロ法では、サンプリング及び階層分割の最適化法を開発し自動化している。
- (2) 破壊基準として線形破壊力学に基づくき裂進展・停止基準 (以下  $K_{IC}/K_{Ia}$  基準) の他、R 6

法[9]による弾塑性破壊基準を導入し、脆性破壊から延性破壊への破壊モードの遷移と延性き裂進展による破壊抵抗の増加を考慮した解析が可能である。この解析手法の導入により、上部棚域におけるき裂停止確率の算定精度を改善するとともに、高靱性材の機器にも適用可能とした。さらに、延性き裂の進展を評価するための標準材料データとして、国内及び米国データに基づき2種類のJ積分抵抗曲線を導入している。

- (3) 部材表面に存在する無限長及び半楕円初期き裂の両方に適用可能である。半楕円き裂の進展解析では、3種のモデルを採用しており、従来の簡易法の他、進展中のき裂形状も含めた詳細な解析もできる。き裂形状を簡略化する従来の方法に比べ高精度の解析が可能である。
- (4) 半楕円亀裂の解析について、寸法固定、アスペクト比固定、長さ固定、寸法分布の多種の初期形状に対して、実用的に対応できる。
- (5) 圧力容器の焼鈍による脆化回復効果の評価機能を導入し、焼鈍に関する費用対効果解析等に適用できる。
- (6) 重ね合せの方法に基づく簡易法の導入及び無限長き裂に対する影響関数法の導入により、肉盛り溶接の熱応力の影響の評価が可能である。影響関数法による評価機能では、クラッドと母材境界部における不連続な熱応力分布を数値入力により正確に入力でき、影響関数法の精度が低下する深い無限長亀裂に対しては、3次多項式応力分布に対する応力拡大係数式への切り替え機能も有する。
- (7) 高温予荷重の効果、残留応力の効果を評価可能である。
- (8) 多数の応力拡大係数評価式、脆化予測式、破壊靱性評価式を導入するとともに、無限長亀裂の応力拡大係数については、新規評価式を開発・導入している。
- (9) 経年変化研究等の成果の反映を図るため、ユーザー入力機能を充実させるとともに、入力データのモジュール化等により、実用性と簡便性を持たせている。
- (10) 温度・応力分布時刻歴入力データの作成のため、専用入力データプロセッサを有している。この入力データプロセッサには、3種の内蔵メッシュを準備した。
- (11) ハードウェアに WINDOWS95 以上の OS を搭載したパソコンが使用可能である。

表 1.2 に、既存コード[10,11]との比較を示す。



表 1.1 PASCAL コードの主な評価項目・解析機能

評価項目		内容
解析対象		過渡事象下における原子炉压力容器の損傷確率
初期き裂	き裂種類	無限長表面き裂、固定寸法無限長き裂 半楕円表面き裂（初期寸法固定、初期き裂長さ固定、 初期き裂アスペクト比固定、き裂深さとアスペクト比 の分布考慮）
	深さ分布	固定、指数分布（Marshall 分布）、OCTAVIA 分布、ユーザー入 力
	アスペクト比分布	固定、対数正規分布、指数分布、ユーザー入力分布
	深さ採点方式	不連続区間採点、連続採点
確率計算	確率変数	初期き裂寸法、化学成分（Cu, Ni, Si, P）、 中性子照射量、延性-脆性遷移温度、破壊靱性、き裂非検出確率
	確率計算手法	重み付きモンテカルロ法、階層別モンテカルロ法
	偏差再計算方式	VISA-II 方式、OCA-P 方式、FAVOR 方式
破壊力学評価	応力拡大係数	無限長表面き裂に対する膜・曲げ応力評価式 無限長表面き裂に対する 3 次応力分布応力拡大係数 無限長表面き裂に対する PASCAL の応力拡大係数 無限長表面き裂に対する影響関数法 （亀裂深さに応じて他の式への切り替えが可能） 半楕円表面き裂に対する Newman-Raju 式 半楕円表面き裂に対する関東らの式 半楕円表面き裂に対する白鳥式 半楕円表面き裂に対する JEAC (Buchalet ら) の評価式 半楕円表面き裂に対する VISA-II の評価式 クラッド効果を考慮した場合の簡略法 クラッド効果を考慮した場合の影響関数法 逐次膜・曲げ応力変換法 無限長表面き裂に対するユーザー入力値
	破壊クライテリア	$K_{Ic}$ , $K_{Ia}$ および塑性崩壊基準 R6 法 (FAD: Option1,2、材料: Category1, 2, 3)
	J-R 曲線データ	国内データに基づく J-R 曲線、米国データに基づく J-R 曲線
主な評価モデル・機能	半楕円き裂の き裂進展評価方式	モデル A: 深さ方向へ進展した後は無限長表面き裂にする モデル B: 長さ方向へ進展した後は無限長表面き裂にする モデル C: 長さ・深さ両方向の進展を独立に評価する
	照射による 上部靱性値の低下	NRC RG 1.162 モデル
	焼鈍効果の評価	焼鈍による $\Delta RTNDT$ の回復・再脆化: NRC RG 1.162 モデル 焼鈍による上部靱性の回復・再脆化: NRC RG 1.162 モデル
	破壊靱性値	米国 NRC 平均曲線、米国 ASME Sec. XI 下限曲線、 米国 ORNL 平均曲線、JEAC4206 の国内予測式、ユーザー入力値
	脆性予測式	米国 RG 1.99 Rev2 式、JEAC4206 の国内予測式、 ユーザー入力値
	中性子照射量の 容器肉厚方向減衰	指数減衰式、ユーザー入力値
	非破壊検査	荒川モデル、LLNL モデル、VISA-II の表面検査評価モデル PISC の体積検査評価モデル、その改良モデル
	解析効率・簡便さの向 上機能	階層別モンテカルロ法の階層分割の最適化 階層別モンテカルロ法のき裂採点の最適化 感度解析用連続計算機能
	決定論的解析	各パラメータの平均値に基づく決定論的解析機能
その他の機能	高温予荷重効果、残留応力の評価、 $K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関関係の考慮 き裂の進展状況の詳細な出力	

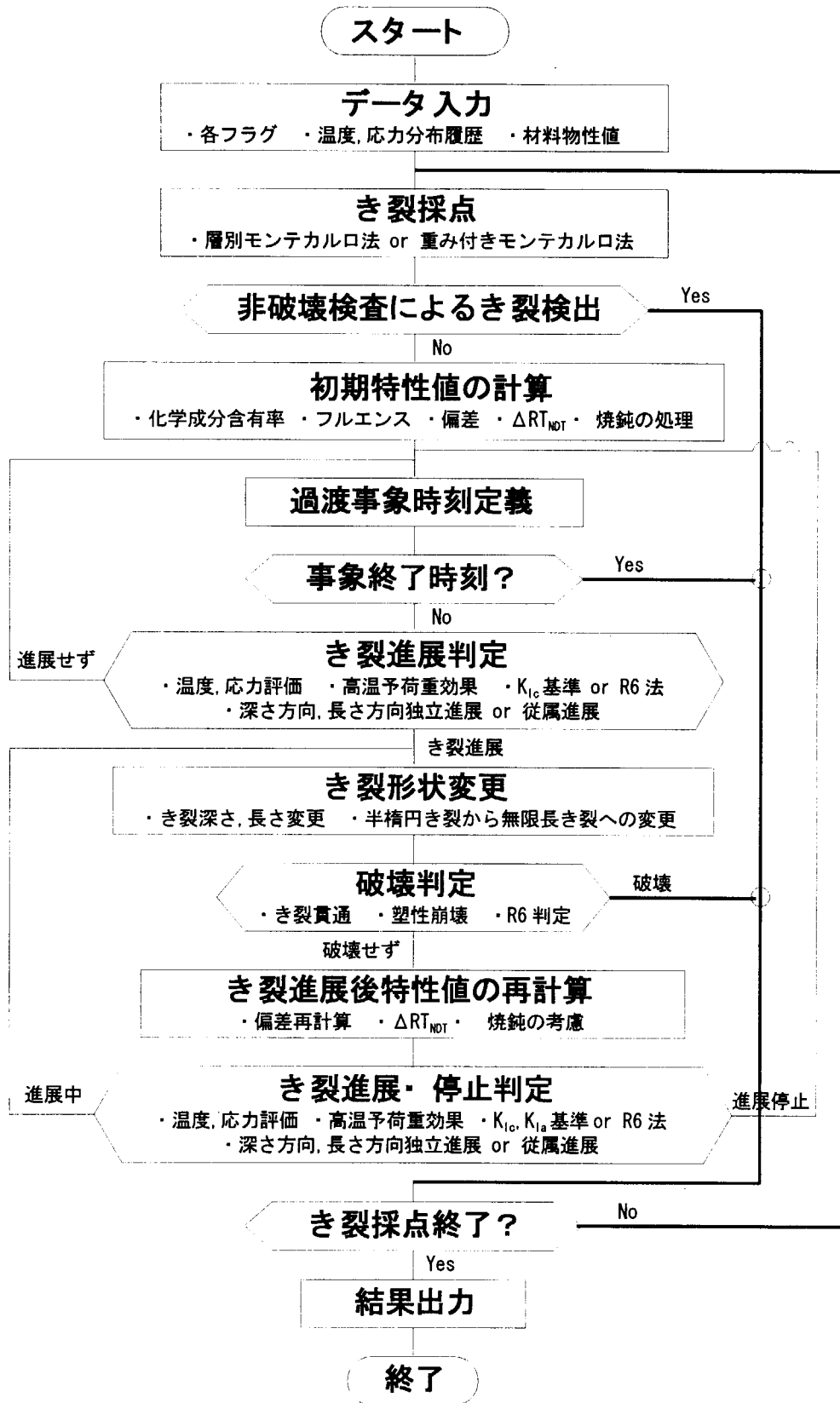


図 1.1 本解析コードの評価概略流れ

表 1.2 圧力容器解析用の既存コードと PASSCAL との比較

コード名 項目	VISA-II	OCA-P	PASCAL
解析対象機器	原子炉圧力容器		
破損確率 の解法	重み付きモンテカルロ法		1. 重み付きモンテカルロ法 2. 層別モンテカルロ法
初期き裂形状	1. 深さ分布を持つ無限長表面き裂 2. 固定長さ半楕円表面き裂 3. 固定アスペクト比半楕円表面き裂		1. 深さ分布を持つ無限長表面 き裂 2. 固定深さ無限長表面き裂 3. 固定長さ半楕円表面き裂 4. 固定アスペクト比半楕円 表面き裂 5. アスペクト比分布を持つ 半楕円き裂 6. 固定寸法半楕円き裂
破壊基準	$K_{Ic}/K_{Ia}$ 基準 (線形破壊力学基準) + 塑性崩壊基準		1. $K_{Ic}/K_{Ia}$ 基準 + 塑性崩壊基準 2. R6 法 (脆性材料、延性材料)
半楕円き裂の 進展解析法	深さ方向への進展開始後は、無限長き裂に置換		1. 深さ方向への進展後は 無限長き裂に置換 (VISA-II、OCA-P と同じ) 2. 深さ・表面両方向に進展評価、 表面方向に進展後は無限長 き裂に置換 3. 深さ・表面両方向にき裂形状も 含めて進展評価
延性脆性遷移 温度及び破壊 靱性の評価方 式	米国 NRC、ASME の各種評価式		1. 米国 NRC、ASME の各種 評価式 2. JEAC4206 の評価式
き裂進展に伴 う延性脆性遷 移温度及び破 壊靱性の計算 法	進展毎に遷移温度と 靱性値の平均値及び 偏差を再計算	遷移温度は平均値のみ 再計算、靱性値は平均値 と偏差を再計算	1. VISA-II と OCA-P の方法を選 択可能 2. 遷移温度と靱性値の平均値の みを再計算
開発機関	米国パンフィックノ ースウエスト研究所	米国オークリッジ研究所	日本原子力研究所

## 2. プログラムの動作環境

本プログラムは FORTRAN 77 で開発されており、解析結果が非常に低い破損確率になることもあり得ることを考慮し、言語の精度を倍精度にしている。

入力データ作成ツールを除いた PFM 解析プログラムはのべ 272 個のルーチンと 24266 行で構成されている。

開発は以下の環境を想定して行ったが、極力計算機のハードウェアに依存せず、汎用性を持たせることを留意した。

- ・ 計算機 : パーソナルコンピューター
- ・ OS : Windows 95 以上
- ・ CPU : Pentium II 以上
- ・ メモリ : 32MB 以上
- ・ HDD : 200MB 以上

これまでは、OS に関しては、Unix、Windows 95、Windows 98、Windows NT、CPU に関しては Pentium、Dec Alpha、Ultra Sparc などにおいて、プログラムの動作を確認した。

### 3. 入力方法

以下では、各入力カードセットの入力フォーマット、その内容について説明し、典型的な解析について入力データ例を示す。

#### 3. 1 各カードセットの入力フォーマット及び入力内容

カードイメージは、以下の3種類に分類される。

- ・ コマンド行

コマンド行は“#”で始まり、キャラクター“#”と8文字以内の単語で構成される。この単語はコマンド行に続く入力データ行の種類、内容を示す。コマンド行によって、各コマンドに対応するモジュールを実行させ、データ入力の機能別分割を実現する。

- ・ 入力データ行

入力データ行はコマンド行の後に続く。コマンド行で示したデータの種類に対して、各入力項目を所定の形式で入力する。コマンド行と入力データ行はセットになっており、入力データ行は複数にわたることもある。

- ・ コメント行

コメント行は半角文字”C“または”c“で始まる。ユーザーの各種コメントをコメント行に記述することができる。データ入力の実行される際には、コメント行はスキップされる。

以下に、PASCALが使用している各入力カードについて説明する。

PASCALでは42の入力カードセットを用いて、様々な解析条件を設定することが可能である。入力カードセットの一覧を示した後に、各カードセットについて詳細に入力方式を示す。

## 入力カードセット一覧 (その1)

No.	カードセット名	内容説明	カードセットタイプ
1	#TITLE	解析タイトルの入力	O
2	#FLAG	解析の流れを制御するためのフラグ入力	M
3	#VESSEL	圧力容器のデータ入力	M
4	#TRANS	過渡事象のデータ入力	M
5	#TEMP	温度分布の時刻歴入力	M
6	#STRESS	応力分布の時刻歴入力 (膜・曲げ応力)	O
7	#PRESFM	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)	O
8	#PRESPT	内圧の時刻歴入力 (ユーザー入力)	O
9	#CRACKA	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力	O
10	#CRACKB	初期き裂アスペクト比の分布 (対数正規分布) の入力	O
11	#CDEPTH	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力	O
12	#CASPCT	半楕円き裂の初期き裂平面の均等分割データの入力	O
13	#CASPCU	半楕円き裂の初期き裂平面のユーザー分割データの入力	O
14	#MATRAL	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力	M
15	#FINIT	半楕円き裂の長さに関するデータ入力	O
16	#EXAM	非破壊検査のデータ入力	O
17	#CNTPRM	解析経過の画面表示間隔の入力	O
18	#TBLPRM	表出力のデータ形式入力	O
19	#CRKAUD	初期き裂深さ分布のユーザー入力	O
20	#CRKBUD	初期き裂アスペクト比分布のユーザー入力	O
21	#KIUD	無限長き裂に対する応力拡大係数分布のユーザー入力	O
22	#CRKBEX	初期き裂アスペクト比分布 (指数分布) の入力	O
23	#KICUD	破壊靱性値 $K_{Ic}$ のユーザー入力	O
24	#KIAUD	破壊靱性値 $K_{Ia}$ のユーザー入力	O
25	#DRTUD	照射脆化のシフト量 $\Delta RT_{NDT}$ のユーザー入力	O
26	#FDRUD	中性子照射量減衰のユーザー入力	O
27	#EXAMLL	非破壊検査パラメータ (LLNL モデル) の入力	O
28	#R6	R6 法のパラメータ入力	O
29	#R6OPT2	R6 法オプション 2 の応力歪み曲線データ入力	O
30	#R6KOMG	R6 法カテゴリ 3 で使用する $K_{\theta}$ 分布の入力	O
31	#R6CTG2	— (現在では使用する必要がない)	—
32	#STRS3D	応力分布の時刻歴入力 (3次多項式分布)	C
33	#CONT	連続解析用データ入力	O
34	#SSAUTO	自動調整層別モンテカルロ法のパラメータ入力	O
35	#CORREL	$K_{Ia}$ と $K_{Ic}$ の相関係数の入力	O

## 入力カードセット一覧 (その2)

No.	カードセット名	内容説明	カードセットタイプ
36	#ANNEAL	焼鈍および再脆化の情報の入力	O
37	#STRSDT	応力のデータテーブル入力	O
38	#RESSTR	残留応力分布の入力	O
39	#CRKFIX	初期き裂深さおよび長さの固定値の入力	O
40	#EXAMAR	非破壊検査パラメータ (荒川式) の入力	O
41	#CLADK	クラッド付き無限長き裂の応力拡大係数切替え寸法	O
42	#END	入力データの終了	M

注：カードセットタイプの M は、このカードセットは必ず入力しなければならないことを意味する。O はこのカードセットは必要に応じて入力すればよいことを意味する。C は他のカードセットもあるが、このカードセットの使用を薦めることを意味する。

解析タイトルの入力 (#TITLE: No.1)

No.	コラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-80 (1)	1	解析タイトル	ANAME	A80	--	--

- ・このカードセットは必要に応じて入力すれば良い
- ・解析タイトルが入力されなかった場合、解析タイトルには "unknown" が用いられる。
- ・解析タイトルの最初の文字が "c" または "C" で始まる場合、その行は「コメント行」として認識されるため、解析タイトルとして認識されない。このような場合は、タイトルの初めに1文字スペースを入れ、コメント行として認識されることを避ける必要がある。（逆に言えば、解析タイトルの初めの1文字に "c" または "C" を用いることはできない）

#TITLE (No.1)



解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG: No.2) その1

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	解析種類 0: 確率論的解析 2: 決定論的解析	IANA	I5	—	—
2	6-10 (1)	2	入力単位系 0: 英国慣用単位系 1: 国際単位系 (SI)	IINPT	I5	—	—
3	11-15 (1)	3	出力単位系 0: 英国慣用単位系 1: 国際単位系 (SI)	IOUTPT	I5	—	—
4	16-20 (1)	4	応力の評価方式 0: 膜・曲げ応力 1: 3次多項式分布 2: 離散点入力 (データテーブル)	ISTRES	I5	—	—
5	21-25 (1)	5	温度の評価方式 0: データテーブル	ITEMP	I5	—	—
6	26-30 (1)	6	内圧の評価方式 0: 4次多項式分布 1: データテーブル	IPRES	I5	—	—
7	31-35 (1)	7	温度及び応力の補間方式 0: 線形補間 (1次)	INTARP	I5	—	—
8	36-40 (1)	8	中性子照射の選択 0: 無し 1: 有り (部材内は指数減衰) 2: 有り (部材内はユーザー入力減衰)	IRRAD	I5	—	—
9	41-45 (1)	9	クラッド有無の選択 0: クラッド無し 1: クラッド有り	ICLAD	I5	—	—
10	46-50 (1)	10	高温予荷重効果有無の選択 0: 無し 1: 有り	IWPS	I5	—	—
11	1-5 (2)	11	非破壊検査 (ISI) 有無の選択 0: 無し 11: VISA-II モデル 12: LLNL モデル 13: 荒川モデル 21: PISC モデル 22: 改良 PISC モデル	IISI	I5	—	—

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG:No.2) その2

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
12	6-10 (2)	12	き裂の存在位置 0: 溶接部 1: 母材部	IWELD	I5	—	—
13	11-15 (2)	13	き裂種類 0: 無限長さ裂 1: 半楕円き裂 (アスペクト比可変) 2: 半楕円き裂 (長さ固定) 3: 半楕円き裂 (アスペクト比固定) 10: 無限長さ裂 (長さ固定) 11: 半楕円き裂 (長さおよび長さ固定)	ICRACK	I5	—	—
14	16-20 (2)	14	き裂配置方向 0: 周方向き裂 1: 軸方向き裂	IORIN	I5	—	—
15	21-25 (2)	15	初期き裂の深さ分布種類 0: Marshall 分布 (指数分布) 1: OCTAVIA 分布 2: ユーザー入力分布 3: ユーザー入力分布 (不連続採点、OCA-P 方式) 10: 指数分布 (連続採点)	IDEPT	I5	—	—
16	26-30 (2)	16	初期アスペクト比分布種類 0: 対数正規分布 1: 指数分布 2: ユーザー入力分布	IASPT	I5	—	—
17	31-35 (2)	17	半楕円き裂の初期き裂平面の定義方式 0: 初期き裂平面自動分割 1: 初期き裂平面のユーザー分割	IPLANE	I5	—	—

#FLAG (No.2)

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG: No.2) その3

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
18	36-40 (2)	18	無限長さ裂の応力拡大係数 11: 周方向き裂 VISA-II 式 (膜・曲げ応力用) 12: 周方向き裂 ユーザー入力 (膜・曲げ応力用) 13: 周方向き裂 VISA-II 式 (3 次多項式用) 14: 周方向き裂 PASCAL の式 (3 次多項式用) 21: 軸方向き裂 VISA-II 式 (膜・曲げ応力用) 22: 軸方向き裂 ユーザー入力 (膜・曲げ応力用) 23: 軸方向き裂 VISA-II 式 (3 次多項式用) 24: 軸方向き裂 PASCAL の式 (3 次多項式用) 31: 周方向き裂 簡易法 (膜・曲げ応力用) 33: 周方向き裂 簡易法 (3 次多項式用) 34: 周方向き裂 影響関数法+PASCAL 3 次式 35: 周方向き裂 影響関数法+VISA-II 3 次式 41: 軸方向き裂 簡易法 (膜・曲げ応力用) 43: 軸方向き裂 簡易法 (3 次多項式用) 44: 軸方向き裂 影響関数法+PASCAL 3 次式 45: 軸方向き裂 影響関数法+VISA-II 3 次式 51: 軸方向き裂 影響関数式	ISIFA	I5	—	—
19	41-45 (2)	19	半楕円き裂の応力拡大係数 11: 周方向き裂 Newman-Raju 式 12: 周方向き裂 白鳥式 13: 周方向き裂 VISA-II 式 14: 周方向き裂 関東式 21: 軸方向き裂 Newman-Raju 式 22: 軸方向き裂 白鳥式 23: 軸方向き裂 VISA-II 式 24: 軸方向き裂 関東式 25: 軸方向き裂 国内 JEAC4206 式 31: 周方向き裂 簡易法 (Newman-Raju) 41: 軸方向き裂 簡易法 (Newman-Raju)	ISIFB	I5	—	—
20	46-50 (2)	20	埋没き裂の応力拡大係数 入力不可	ISIFI	I5	—	—
21	1-5 (3)	21	き裂進展に伴う確率変数の評価方式 0: VISA-II の評価方式 1: NRC 推奨方式 2: OCA-P の評価方式	IPROG	I5	—	—

#FLAG (No.2)

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG: No.2) その4

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
22	6-10 (3)	22	半楕円き裂の進展方式 0: 長さ方向に進展したら溶接長さの半楕円き裂 (モデルB) 1: 長さ方向に進展したら無限長さき裂(モデルB) 2: 深さ方向に進展したら無限長さき裂(モデルA) 3: 長さ方向の進展停止も考慮する(モデルC)	IFINIT	I5	—	—
23	11-15 (3)	23	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式 0: 米国 NRC の平均曲線 1: 米国 ASME Section XI 下限曲線 2: 米国 ORNL 平均曲線 3: ユーザー入力分布 4: JEAC4206 の国内平均曲線	IKIC	I5	—	—
24	16-20 (3)	24	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式 0: 米国 NRC の平均曲線 1: 米国 ASME Section XI 下限曲線 2: 米国 ORNL 平均曲線 3: ユーザー入力分布 4: JEAC4206 の国内平均曲線	IKIA	I5	—	—
25	21-25 (3)	25	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式 0: JEAC4201 の国内予測式 1: 米国 RG1.99 Rev.2 式 5: ユーザー入力分布	IDRTR	I5	—	—
26	26-30 (3)	26	破壊クライテリア 0: $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$ クライテリア及び塑性崩壊基準 1: R6 法	ICRUTN	I5	—	—
27	31-35 (3)	27	計算結果の出力 0: 結果ファイル出力する。 1: 結果ファイル出力しない。 10: 結果ファイル出力する。 11: 結果ファイル出力しない。	IGRAPH	I5	—	—

#FLAG (No.2)

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG:No.2) その5

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
31	1-5 (4)	31	自動調整層別モンテカルロ法 0: 自動調整を行わない 100: き裂探点数の最適化を実施 10: 深さ比方向の階層間隔を自動調整 1: アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 110: き裂探点数および深さ比分割最適化 101: き裂探点数およびアスペクト比分割最適化 10: 深さ比およびアスペクト比分割最適化 111: 全ての自動調整を実施	IPTY2	I5	—	—
32	6-10 (4)	32	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の関連の考慮 0: 関連を考慮しない 1: 関連を考慮する	ICOREL	I5	—	—
33	11-15 (4)	33	フルエンスによる上部靱性値の低下予測 0: 考慮しない 1: 米国 NRC RG 1.162 式	IDUSE	I5	—	—
34	16-20 (4)	34	脆鈍および再脆化の考慮 0: 考慮しない 1: $RT_{NDT}$ に対する効果を考慮 10: 上部靱性値に対する効果を考慮 11: $RT_{NDT}$ 、上部靱性値に対する効果を考慮	IANNE	I5	—	—
35	21-25 (4)	35	残留応力の考慮 0: 残留応力を考慮しない 1: 残留応力を考慮する	IRSTRS	I5	—	—
36	26-30 (4)	36	逐次膜曲げ変換手法 0: 実施しない 1: 従来型逐次膜・曲げを実施 (無限長き裂) 10: 従来型逐次膜・曲げを実施 (半楕円き裂) 11: 従来型逐次膜・曲げを実施 (全き裂) 20: 改良型逐次膜・曲げを実施 (半楕円き裂) 21: 無限長き裂には従来型逐次膜・曲げを、半楕円き裂には改良型逐次膜・曲げを実施	ISBSFG	I5	—	—
37	31-35 (4)	37	破壊靱性 $K_{Ic}$ の上下シフト量 $ILIMITC/10 \times$ 標準偏差は平均値の上下シフト量となる	ILIMITC	I5	—	—
38	36-40 (4)	38	破壊靱性 $K_{Ia}$ の上下シフト量 $ILIMITA/10 \times$ 標準偏差は平均値の上下シフト量となる	ILIMITA	I5	—	—

#FLAG (No.2)

- ・このカードセットは必ず入力しなければならない。
- ・応力拡大係数式 (No.18 および 19) は、き裂方向、応力の入力形式、クラッドの有無によって使用できるものとできないものがあるので、注意が必要である。
- ・4行目 (No.31 および No.32) は、入力する必要があるときのみ入力すればよい。この行を省略した場合は、No.31～No.36 は 0 として取り扱われる。
- ・No.31 の自動調整層別モンテカルロ法は、アスペクト比の分布を考慮した半楕円き裂を対象とし、さらに半楕円き裂の初期き裂平面の定義方式 (No.17) が 0 (初期き裂平面自動分割) の場合にのみ用いることができる。
- ・No.36 の逐次膜・曲げ変換を用いる場合、応力の評価方式は入力する応力のタイプ (#STRESS、#STRS3D、#STRSDT) にあわせて設定する。逐次膜・曲げ変換を行った場合、応力は膜・曲げ応力になるので応力拡大係数は膜・曲げ応力に対応したものをを用いる必要がある。

#FLAG (No.2)

圧力容器のデータ入力 (#VESSEL : No.3)

No.	カード (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	圧力容器の肉厚 (クラッド厚も含む)	THICK	F10.0	inches	m
2	11-20 (1)	2	圧力容器の内径	RAD	F10.0	inches	m
3	21-30 (1)	3	圧力容器内面の中性子照射量 (フルエンス)、 焼鈍を考慮する場合 (FLAG34=0 以外) は、焼鈍時フルエンス	FLUEC	F10.0	$\times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>	$\times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>
4	31-40 (1)	4	圧力容器の炉壁内中性子照射量減衰定数	DECAY	F10.0	inches <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
5	41-50 (1)	5	クラッドの厚さ	TCLAD	F10.0	inches	m

- ・ このカードセットは必ず入力しなければならない。
- ・ クラッドの厚さ (No.5) については、クラッドを考慮しない場合は入力を省略しても良い。
- ・ フルエンス (No.3) の入力単位は $\times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>である。入力のケタに注意すること。

過渡事象のデータ入力 (#TRANS : No.4)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	過渡事象の総評価時間	TMAX	F10.0	minutes	minutes
2	11-20 (1)	2	過渡事象評価における時間刻み	TDET	F10.0	minutes	minutes
3	21-30 (1)	3	き裂進展刻み方式選択フラグ 0: 等間隔 1: 等比級数	ICPFG	I10	—	—
4	31-40 (1)	4	第1回目のき裂進展刻み, $\Delta a$	CDET	F10.0	inches	mm
5	41-50 (1)	5	き裂進展刻み増幅率, $\alpha$ , ( $\Delta a = \alpha \Delta a_{i-1}$ となる)	CAMP	F10.0	—	—
6	51-60 (1)	6	き裂破壊深さ	CEND	F10.0	容器肉厚の割合, a/T	容器肉厚の割合, a/T
7	1-5 (2)	7	過渡事象評価時間のユーザー入力点数	NTDIV	I5	—	—
8	1-50 (3~)		過渡事象評価時間データ	TPOS	F10.0	minutes	minutes

- このカードセットは必ず入力しなければならない。
- 過渡事象の評価時刻を等間隔で行う場合は、No.2の時間刻みを設定し、No.7およびNo.8を入力してはいけない。
- 過渡事象の評価時刻を等間隔で設定しない場合は、No.7およびNo.8を用いて評価時刻を入力する。この際、No.2で設定された時間刻みは無視される。
- No.5のき裂進展刻み増幅率は等比級数の係数を意味している。等間隔でき裂を進展させる場合は、この値は使用されない。

#TRANS (No.4)



温度分布の時刻歴入力 (#TEMP : No.5)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	温度分布データベースの時刻分割数	NTDATL	I5	—	—
2	6-10 (1)		温度分布データベースの炉壁内位置分割数	NTDATC	I5	—	—
3	1-50 (2~)		データを入力するための炉壁内位置データ	XOT (NTDATC)	F10.0	容器肉厚の割合,X/T	容器肉厚の割合,X/T
4	1-10 (不定)		データを入力するための時刻データ	TMFT (NTDATL)	F10.0	minutes	minutes
5	1-50 (不定)		温度データ	TPDIS (NTDATL,NTDATC)	F10.0	.	°C

・このカードセットは必ず入力しなければならぬ。

・#TEMP の入力例を以下に示す。

```

0-----10-----20-----30-----40-----50----->
#TEMP
5 5
0.1 0.2 0.4 0.6 1.0
10.0
1. 151E+02 1. 578E+02 1. 631E+02 1. 733E+02 1. 827E+02
20.0
7. 662E+01 1. 107E+02 1. 149E+02 1. 230E+02 1. 310E+02
40.0
6. 611E+01 8. 631E+01 8. 876E+01 9. 364E+01 9. 846E+01
60.0
6. 558E+01 7. 786E+01 7. 935E+01 8. 231E+01 8. 525E+01
100.0
6. 556E+01 7. 012E+01 7. 068E+01 7. 178E+01 7. 287E+01
0-----10-----20-----30-----40-----50----->

```

時刻分割数および位置分割数  
 温度データを入力するための炉壁内位置データ(X/T)。NTDATC=5 なので5個入力している  
 温度データを入力するための時刻データ。この時刻に対応する温度データを以下の行で入力する。  
 時刻10分のときの温度データ。炉壁内位置データと対応する順番で入力する。  
 → NTCAIL=5 なので、時刻データおよび温度データのセットを5セット入力する。

#TEMP (No.5)

膜・曲げ応力分布の時刻歴入力 (#STRESS : No.6)

No.	クラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	軸方向き裂に作用する応力データおよび母材の時刻分割数	NSTRESL	I5	—	—
2	1-10 (2~)		軸方向き裂に作用する応力データを入力するための時刻データ	TMFSTL (NSTRESL)	F10.0	minutes	minutes
3	11-20 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用する母材の膜応力	SMLDT (NSTRESL)	F10.0	ksi	MPa
4	21-30 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用する母材の曲げ応力	STLDT (NSTRESL)	F10.0	ksi	MPa
5	31-40 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用するクラッドの膜応力	CMLDT (NSTRESL)	F10.0	ksi	MPa
6	41-50 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用するクラッドの曲げ応力	CTLDT (NSTRESL)	F10.0	ksi	MPa
7	1-5 (不定)	2	周方向き裂に作用する応力データおよび母材の時刻分割数	NSTRESC	I5	—	—
8	1-10 (不定)		周方向き裂に作用する応力データを入力するための時刻データ	TMFSTC (NSTRESC)	F10.0	minutes	minutes
9	11-20 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用する母材の膜応力	SMCDT (NSTRESC)	F10.0	ksi	MPa
10	21-30 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用する母材の曲げ応力	STCDT (NSTRESC)	F10.0	ksi	MPa
11	31-40 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用するクラッドの膜応力	CMCDT (NSTRESC)	F10.0	ksi	MPa
12	41-50 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用するクラッドの曲げ応力	CTCDT (NSTRESC)	F10.0	ksi	MPa

- ・ このカードセットは応力の評価方式 (#FLAG (No.2), ISTRES (No.4)) に0 (膜・曲げ応力) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・ 時刻分割数を入力した後、その分割数と同数の定義時刻データおよび応力データを入力する必要がある。軸方向き裂に作用する応力データについて全て入力した後、周方向き裂に作用する応力データを入力する。
- ・ 入力する応力は、「き裂に作用する応力」である。軸方向き裂に作用する応力は、压力容器の場合は一般的に周方向応力であり、周方向き裂に作用する応力は、压力容器の場合は一般的に軸方向応力である。取り違えないように注意を要する。
- ・ クラッドに対する応力は、クラッドを考慮していない場合は入力しなくても良い。

#STRESS (No.6)

内圧の時刻歴入力 (4次多項式) (#PRESFM: No.7)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	時刻 0 のときの内圧	PDATA (1)	F10.0	ksi	MPa
2	11-20 (1)		時刻 1/4 TMAX のときの内圧	PDATA (2)	F10.0	ksi	MPa
3	21-30 (1)		時刻 1/2 TMAX のときの内圧	PDATA (3)	F10.0	ksi	MPa
4	31-40 (1)		時刻 3/4 TMAX のときの内圧	PDATA (4)	F10.0	ksi	MPa
5	41-50 (1)		時刻 TMAX のときの内圧	PDATA (5)	F10.0	ksi	MPa

・このカードセットは内圧の評価方式 (#FLAG No.6) で 4次多項式分布が選択された場合に入力する必要がある。

・TMAX とは過渡事象の総評価時間 (#TRANS No.1 にて定義) のことである。

#PRESFM (No.7)

内圧の時刻歴入力 (ユーザー分布) (#PRESPT : No.8)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	内圧データベースの時刻分割数	NUMP	I10	—	—
2	1-10 (2~)		内圧データを入力する時刻データ	TIMP (NUMP)	F10.0	minutes	minutes
3	11-20 (2~)		内圧データ	PDT (NUMP)	F10.0	ksi	MPa

- ・このカードセットは内圧の評価方式 (#FLAG No.6) でデータテーブルが選択された場合に入力する必要がある。
- ・時刻データおよび内圧データは、定義された時刻分割数と同数を入力しなければならぬ。

#PRESPT (No.8)

初期き裂深さ分布 (指数分布) の入力 (#CRACKA : No.9)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	指数分布の指数	ALAMDA	F10.0	inches <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>
2	11-20 (1)	2	き裂の存在確率の打ち切りデータ	DEPAMP	F10.0	き裂存在確率	き裂存在確率

- ・ このカードセットは初期き裂の深さ分布種類 (#FLAG No.15) に Marshall 分布 (指数分布) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・ Marshall 分布の場合は、ALAMDA=0.16 (mm<sup>-1</sup>) である。
- ・ 深いき裂は存在確率が低いため、解析上の重要性が低い。き裂の存在確率の打ち切りデータに値を入力すると、その存在確率以下のデータは取り扱わなくなるため、解析時間の短縮につながる。この機能はモンテカルロ法の手法に重み付きモンテカルロ法が採用されている場合にのみ有効である。き裂の存在確率の打ち切りデータが設定されていない (=0) 場合、重み付きモンテカルロ法のき裂深さ分布はスレシヨルド値 (設定されていない場合は容器内表面) から容器外壁までを、入力された分割数を用いて均等に分割する。打ち切りデータがある場合は、スレシヨルド値から打ち切り位置までを分割することになるため、無駄な分割がなくなり、き裂の存在確率の高い箇所を集中的に分割するため解析精度も向上する。これについては、重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力 (#CDEPTH) も参照されることを望む。

#CRACKA (No.9)

初期き裂アスペクト比分布 (対数正規分布) の入力 (#CRACKB : No.10)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	き裂アスペクト比の平均値	BOAMED	F10.0	—	—
2	11-20 (1)	2	き裂アスペクト比の標準偏差	BOASIG	F10.0	—	—

- このカードセットは初期アスペクト比分布種類 (#FLAG No.16) に 対数正規分布が選択された場合に入力する必要がある。
- LLNL は BOAMED=1.336、BOASIG=0.538 という値を推奨している。これはアスペクト比  $a/b$  が 0.2 よりも小さいき裂の存在確率を 0.01 とした場合のデータである。

#CRACKB (No.10)

重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力 (#CDEPTH : No.11)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	き裂深さ分布の定義点数	NAFLOW	I5	—	—
2	6-15 (1)	2	シミュレーションを打ち切るき裂深さサンプル数	NSMAX	I10	—	—
3	16-20 (1)	3	シミュレーションを打ち切るき裂破壊数	NFAIL	I5	—	—
4	21-30 (1)	4	き裂深さのしきい値	THRESH	F10.0	inches	mm
5	1-10 (2)	5	95%信頼区間が破壊確率に占める割合 (計算打ち切り条件として使用)	CIF95	F10.0	%	%

- ・このカードセットは無限長き裂、半楕円き裂 (初期き裂長さ固定)、半楕円き裂 (初期き裂アスペクト比固定) を対象としている場合に入力する必要がある。
- ・き裂深さが非常に小さい場合、き裂が進展する可能性は非常に小さくなる。そのような場合、き裂深さのしきい値 (スレショルド値) を設定する。この値よりも小さなき裂はサンプリングされなため、解析の効率が上がる。サンプリングされる範囲のき裂存在確率は、サンプリングされな範囲のき裂存在確率に基づき修正される。なお、サンプリングされるき裂深さの上限は、压力容器肉厚またはき裂存在確率の打ち切りデータ (#CRACKA (No.9), DEPAMP (No.2)) で定義される。
- ・No.5 の「95%信頼区間が破壊確率に占める割合」は、この判定条件を用いた計算の打ち切りを行わない場合、入力しなくても良い。

#CDEPTH (No.11)

半楕円き裂初期き裂平面の自動分割データ入力 (#CASPCT : No.12)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	き裂深さ比座標 (x / thickness) の分割数	NAOT	I5	—	—
2	6-10 (1)	2	き裂アスペクト比座標 (a / b) の分割数	NAOB	I5	—	—
3	11-20 (1)	3	き裂深さ比座標 (x / thickness) の下限値	AOTLOW	F10.0	—	—
4	21-30 (1)	4	き裂深さ比座標 (x / thickness) の上限値	AOTUP	F10.0	—	—
5	31-40 (1)	5	き裂アスペクト比座標 (a / b) の下限値	AOBLOW	F10.0	—	—
6	41-50 (1)	6	き裂アスペクト比座標 (a / b) の上限値	AOBUP	F10.0	—	—
7	51-55 (1)	7	各階層の採点数	NSAMP	I5	—	—

- ・半楕円き裂 (初期き裂アスペクト比の分布を考慮) を対象としており、半楕円き裂の初期き裂平面の定義方式 (#FLAG (No.2), IPLANE (No.17)) に 0 (初期き裂平面自動分割) が入力されている場合に入力する必要がある。
- ・入力された分割数および上限・下限値を用いて、初期き裂平面を等間隔に分割する。
- ・このカードセットを入力した場合のみ、自動調整層別モンテカルロ法を用いることも可能になる。自動調整層別モンテカルロ法については、#SSAUTO (No.34) に詳細を記す。

#CASPCT (No.12)



半楕円き裂初期き裂平面のユーザー分割データ入力 (#CASPCU : No.13)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	き裂平面階層分割総数	NCELL	I5	—	—
2	1-10 (2~)		ある階層におけるき裂深さ比座標 (x / thickness) の下限値	AOT1 (NCELL)	F10.0	—	—
3	11-20 (2~)		ある階層におけるき裂深さ比座標 (x / thickness) の上限値	AOT2 (NCELL)	F10.0	—	—
4	21-30 (2~)		ある階層におけるき裂アスペクト比座標 (a / b) の下限値	AOB1 (NCELL)	F10.0	—	—
5	31-40 (2~)		ある階層におけるき裂アスペクト比座標 (a / b) の上限値	AOB2 (NCELL)	F10.0	—	—
6	41-45 (2~)		各階層の採点数	MSAMP (NCELL)	I5	—	—

- ・半楕円き裂 (初期き裂アスペクト比の分布を考慮) を対象としており、半楕円き裂の初期き裂平面の定義方式 (#FLAG (No.2), IPLANE (No.17)) に 1 (初期き裂平面のユーザー分割) が入力されている場合に入力する必要がある。
- ・き裂平面階層の分割総数 (NCELL) を入力し、それと同数の階層情報を入力する必要がある。
- ・このカードセットを用いた場合は、自動調整層別モンテカルロ法を用いることができない。自動調整層別モンテカルロ法を用いる場合は、半楕円き裂初期き裂平面の自動分割データ入力 (#CASPCU : No.12) を使用しない。

#CASPCU (No.13)

評価対象材料の物性、化学成分に関するデータ入力 (#MATRAL: No.14) その1

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	ヤング率	YOUNG	F10.0	ksi	MPa
2	11-20 (1)	2	ポアソン比	UN	F10.0	—	—
3	21-30 (1)	3	初期 RT <sub>NDT</sub> の平均値	RTMED	F10.0	°F	°C
4	31-40 (1)	4	初期 RT <sub>NDT</sub> の標準偏差	RTSIG	F10.0	°F	°C
5	41-50 (1)	5	ΔRT <sub>NDT</sub> の標準偏差	DRSIG	F10.0	°F	°C
6	1-10 (2)	6	ΔRT <sub>NDT</sub> の標準偏差の打ち切り割合	TDRSIG	F10.0	標準偏差の倍数	標準偏差の倍数
7	11-20 (2)	7	Cu の含有率の平均値	CUMED	F10.0	wt%	wt%
8	21-30 (2)	8	Cu の含有率の標準偏差	CUSIG	F10.0	wt%	wt%
9	31-40 (2)	9	Cu の含有率の最小値	CUMIN	F10.0	wt%	wt%
10	41-50 (2)	10	Cu の含有率の最大値	CUMAX	F10.0	wt%	wt%
11	1-10 (3)	11	Ni の含有率の平均値	FNIMED	F10.0	wt%	wt%
12	11-20 (3)	12	Ni の含有率の標準偏差	FNISIG	F10.0	wt%	wt%
13	21-30 (3)	13	Ni の含有率の最小値	FNIMIN	F10.0	wt%	wt%
14	31-40 (3)	14	Ni の含有率の最大値	FNIMAX	F10.0	wt%	wt%
15	41-50 (3)	15	P の含有率の平均値	PHOMED	F10.0	wt%	wt%
16	1-10 (4)	16	P の含有率の標準偏差	PHOSIG	F10.0	wt%	wt%
17	11-20 (4)	17	P の含有率の最小値	PHOMIN	F10.0	wt%	wt%
18	21-30 (4)	18	P の含有率の最大値	PHOMAX	F10.0	wt%	wt%
19	31-40 (4)	19	Si の含有率の平均値	SIMED	F10.0	wt%	wt%

#MATRAL (No.14)

評価対象材料の物性、化学成分に関するデータ入力 (#MATRAL: No.14) その2

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
20	41-50 (4)	20	Siの含有率の標準偏差	SISIG	F10.0	wt%	wt%
21	1-10 (5)	21	Siの含有率の最小値	SIMIN	F10.0	wt%	wt%
22	11-20 (5)	22	Siの含有率の最大値	SIMAX	F10.0	wt%	wt%
23	21-30 (5)	23	$K_{Ic}$ の標準偏差	FKCSIG	F10.0	平均値の倍数	平均値の倍数
24	31-40 (5)	24	$K_{Ic}$ の標準偏差の打ち切り割合	TKCSIG	F10.0	標準偏差の倍数	標準偏差の倍数
25	41-50 (5)	25	$K_{Ia}$ の標準偏差	FKASIG	F10.0	平均値の倍数	平均値の倍数
26	1-10 (6)	26	$K_{Ia}$ の標準偏差の打ち切り割合	TKASIG	F10.0	標準偏差の倍数	標準偏差の倍数
27	11-20 (6)	27	中性子照射量の標準偏差	FLUSIG	F10.0	平均値の倍数	平均値の倍数
28	21-30 (6)	28	上部靱靱性値	UPKIC	F10.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>
29	31-40 (6)	29	流動応力	SFLOW	F10.0	ksi	MPa

- ・このカードセットは必ず入力しなければならぬ。
- ・ヤング率 (YOUNG) およびポアソン比 (UN) は、J-R 曲線を計算する際に利用される。
- ・Pに関するデータ (No.15 ~ No.18) および Siに関するデータ (No.19 ~ No.22) は、 $\Delta RT_{NDT}$  の評価式 (#FLAG (No.2), IDRTR (No.25)) に 1 (JEAC の国内予測式) が指定されていない場合は使用されない。
- ・ $K_{Ic}$  および  $K_{Ia}$  の偏差に関するデータ (No.23 ~ No.26) は、破壊クラリティア (#FLAG (No.2), ICRITN (No.26)) に 0 ( $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$  クラリティア) が指定されている時のみ有効となる。このパラメータに 1 (R6 法) が指定されている場合は、#R6 (No.28) にて偏差に関する設定を行う。
- ・上部靱靱性値の有効範囲が広い場合は、 $K_{Ic} < K_{Ia}$  の状況を生じないためには、 $K_{Ic}$  および  $K_{Ia}$  の標準偏差打ち切り割合を同じにすることを薦める。

#MATRAL (No.14)

半楕円き裂の長さに関するデータ入力 (#FINIT : No.15)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	き裂の最大長さ	FLENG	F10.0	inches	m
2	11-20 (1)	2	長さ方向のき裂進展刻み	CLAMP	F10.0	長さ方向き裂進展刻みの倍数	
3	21-30 (1)	3	き裂を無限長さき裂へと変更させるアスペクト比	TRINF	F10.0	—	—
4	31-40 (1)	4	初期き裂長さまたは初期き裂アスペクト比の逆数	CKLNG	F10.0	長さ固定の場合は初期き裂長さ (UK : inches, SI : m)、アスペクト比固定の場合はアスペクト比の逆数 $b/a$	

- ・ このカードセットは半楕円き裂を解析対象としている場合に入力する必要がある。
- ・ き裂の最大長さ (FLENG) は、半楕円き裂の進展則 (#FLAG (No.2), IFINIT (No.22)) に 0 (長さ方向に進展したら溶接長さの半楕円き裂) が指定されている場合にのみ使用される。き裂方向が周方向き裂で、き裂の最大長さが压力容器の周長よりも長い場合は、压力容器の周長の最大長さとして用いられる。
- ・ 長さ方向のき裂進展刻み (CLAMP) は、半楕円き裂の進展則 (#FLAG (No.2), IFINIT (No.22)) に 3 (長さ方向の進展停止も考慮する) が指定された場合にのみ有効となる。長さ方向のき裂進展刻みは過渡現象のデータ入力 (#TRANS, No.4) にて入力されており、この長さ方向の進展刻みに CLAMP を掛けて長さ方向の進展刻みを評価する。
- ・ き裂を無限長さき裂へと変更させるアスペクト比 (TRINF) は、半楕円き裂の進展則 (#FLAG (No.2), IFINIT (No.22)) に 3 (長さ方向の進展停止も考慮する) が指定された場合にのみ有効となる。長さ方向へき裂が進展していき、指定アスペクト比 (TRINF) を超えたときにき裂を無限長さき裂に置き換える。
- ・ 初期き裂長さまたは初期き裂アスペクト比 (CKLNG) は、き裂種類 (#FLAG (No.2), ICRACK (No.13)) に 2 (半楕円き裂 (長さ固定)) または 3 (半楕円き裂 (アスペクト比固定)) が指定された場合に有効となる。初期き裂アスペクト比を入力する場合は、アスペクト比の逆数  $[b/a]$  で入力する必要があるため、十分な注意を要する。

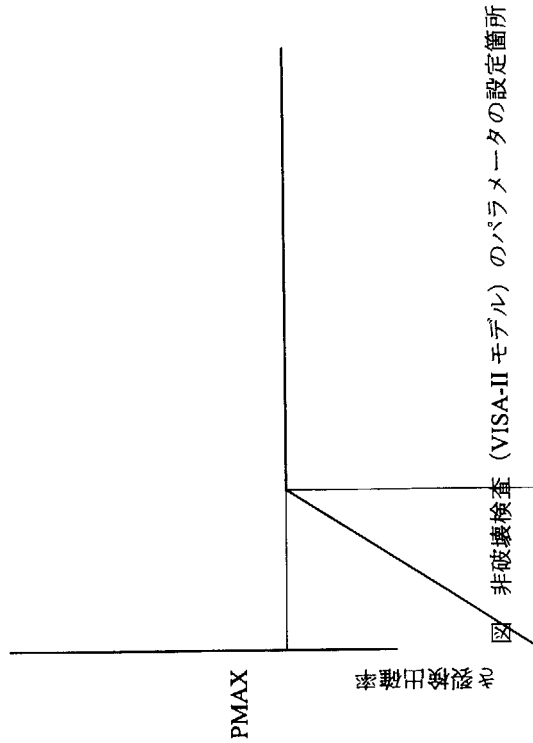
b はき裂長さの半長である。

#FINIT (No.15)

非破壊検査 (VISA-II モデル) のデータ入力 (#EXAM: No.16)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	表面き裂の最大検出確率	PMAX	F10.0	--	--
2	11-20 (1)	2	PMAX に達したときのき裂深さ	AC	F10.0	inches	mm

- ・このカードセットは非破壊検査有無の選択 (#FLAG (No.2), IISI (No.11)) に 11 (表面検査 VISA-II モデル) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・VISA-II モデルでは、条件が良い場合は PMAX=0.95, AC=0.25 inches、条件が悪い場合は PMAX=0.75, AC=1.00 inches としている。各パラメータの意味あいを以下の図で示す。



#EXAM (No.16)

カウンタ出力のデータ入力 (#CNTPRM : No.17)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	き裂階層出力間隔	IOUTCL	I10	-	-
2	11-20 (1)	2	き裂採点出力間隔	IOUTCK	I10	-	-

- ・このカードセットは必要に応じて入力すれば良い。このカードセットが入力されなかった場合は、IOUTCL=1000、IOUTCK=10 がデフォルト値として採用される。
- ・き裂階層出力間隔は、層別モニタカルロ法を用いている場合に、計算の進行状況を画面出力する間隔を設定する。例えば IOUCL=10 の場合、10 階層分の計算が終了した時点で、計算の途中経過を画面出力する。
- ・き裂採点出力間隔は、重み付きモンテカルロ法を用いている場合に、計算の進行状況を画面出力する間隔を設定する。例えば IOUTCK=1000 の場合、1000 個のき裂に対する計算が終了した時点で、計算の途中経過を画面出力する。

カウント出力のデータ入力 (#TBLPRM : No.18)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	表出力の形式 0 : Excel 形式 1 : GnuPlot 形式	N3DFG	I10	—	—
2	11-20 (1)	2	き裂進展状況ファイルに出力するき裂数	NFPCNT	I10	—	—
3	21-30 (1)	3	表出力を行う際の、深さ方向分割数	N3DDV	I10	—	—

- ・このカードセットは必要に応じて入力すれば良い。このカードセットが入力されなかった場合、N3DFG=0, NFPCNT=0, N3DDV=30 がデフォルト値として設定される。
- ・き裂進展状況ファイルには、採点されたき裂の情報（き裂深さ、き裂長さ、各種偏差の量等）やき裂の進展・停止情報（応力拡大係数、破壊靱性値等）が出力される。このファイル情報量が多いため、出力するき裂数に制限を施している。NFPCNT=100 の場合は、進展したき裂 100 個の情報についてのみ出力する。
- ・表出力を行う際には、時間の分割数、容器肉厚の分割数、アスペクト比の分割数が必要である。時間については、入力された評価時間での情報を出力するが、容器肉厚の分割はこの N3DDV を用いて設定する。なお、このパラメータは重み付きモンテカルロ法を用いて解析を行っている場合にのみ有効であり、層別モンテカルロ法を用いている場合は、入力された深さ比分割の設定を用いて出力を行うので、注意が必要である。アスペクト比の分割についても、同様に層別モンテカルロ法のデータを用いる。

初期き裂深さ分布のユーザー入力 (#CRKAUD : No.19)

No.	コラム (行番号)	連続計 算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	初期き裂深さ分布の入力区間数	ICRKA	I10	—	—
2	1-15 (2~)		入力区間の開始深さ	SCRKA (ICRKA)	F15.0	inches	m
3	16-30 (2~)		入力区間の終了深さ	ECRKA (ICRKA)	F15.0	inches	m
4	31-45 (2~)		入力区間内のき裂存在確率	PCRKA (ICRKA)	F15.0	—	—

・このカードセットは初期き裂の深さ分布種類 (#FLAG (No.2), IDEPT (No.15)) に 2 (ユーザー入力分布) または 3 (ユーザー入力分布 (不連続採点)) が指定された場合に  
入力する必要がある。

・初期き裂深さ存在確率分布の分割区間数を ICRKA パラメータで指定し、No.2 ~No.4 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。

・入力区間は深さ 0.0 から初め、き裂存在確率の和が 1.0 になるまで入力する必要がある。区間は途中に切れ目や重なりが生じてはならず、連続していなければならない  
い。

・このカードセットを用いた場合は、重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力 (#CDEPTH, No.11) で設定されたき裂深さ分布の定義点数  
(NAFLOW, No.1) の値は無視される。

#CRKAUD (No.19)



初期き裂深さ分布のユーザー入力 (#CRKBUD : No.20)

No.	コラム (行番号)	連続計 算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	初期き裂アスペクト比分布の入力区間数	ICRKB	I10	—	—
2	1-15 (2~)		入力区間の開始深さ	SCRKB (ICRKB)	F15.0	—	—
3	16-30 (2~)		入力区間の終了深さ	ECRKB (ICRKB)	F15.0	—	—
4	31-45 (2~)		入力区間内のき裂存在確率	PCRKB (ICRKB)	F15.0	—	—

- ・このカードセットは初期き裂の深さ分布種類 (#FLAG (No.2), IASPT (No.16)) に2 (ユーザー入力分布) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・初期き裂アスペクト比存在確率分布の分割区間数を ICRKB パラメータで指定し、No.2 ~No.4 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。
- ・入力区間はアスペクト比  $a/b = 0.0$  から初め、き裂存在確率の和が 1.0 になるまで入力する必要がある。区間は途中で切れ目や重なりが生じてはならず、連続していなければならない。

#CRKBUD (No.20)

無限長き裂に対する応力拡大係数分布のユーザー入力 (膜・曲げ応力を対象) (#KIUD : No.21)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	データを入力する際の容器肉厚方向分割数	KIDATD	I5	—	—
2	6-10 (1)		データを入力する際の膜応力分割数	KIDATM	I5	—	—
3	11-15 (1)		データを入力する際の曲げ応力分割数	KIDATT	I5	—	—
4	1-75 (2~)		$K_I$ を定義するき裂深さ	XKI (KIDATD)	F15.0	inches	m
5	1-15 (不定)		$K_I$ を定義する膜応力の大きさ	STRESM (KIDATM)	F15.0	ksi	MPa
6	1-15 (不定)		$K_I$ を定義する曲げ応力の大きさ	STREST (KIDATT)	F15.0	ksi	MPa
7	1-75 (不定)		定義したき裂深さ、膜応力に対する $K_I$	AKISM (KIDATM, KIDATD)	F15.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>
8	1-75 (不定)		定義したき裂深さ、曲げ応力に対する $K_I$	AKIST (KIDATT, KIDATD)	F15.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>

- ・ このカードセットは、無限長き裂の応力拡大係数 (#FLAG (No.2), ISIFA (No.18)) に 12 (周方向き裂 ユーザー入力 (膜・曲げ応力用)) または 22 (軸方向き裂 ユーザー入力 (膜・曲げ応力用)) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・ 応力拡大係数を定義するき裂深さ、膜応力の大きさ、曲げ応力の大きさは、すべて値の小さいものから順番に入力しなければならぬ。
- ・ #KIUD の入力例を以下に示す。

#KIUD (No.21)

C	10	20	30	40	50	60	70
#KIUD							
5	5	5					
2. 28600E-03	4. 57200E-03	6. 85800E-03	9. 14400E-03	1. 14300E-02			
7. 00000E+01	9. 57088E+00	1. 18181E+01	1. 37577E+01	1. 55070E+01			
6. 71197E+00	1. 02545E+01	1. 26622E+01	1. 47403E+01	1. 66146E+01			
7. 50000E+01	1. 09382E+01	1. 35063E+01	1. 57230E+01	1. 77223E+01			
7. 19139E+00	1. 16218E+01	1. 43505E+01	1. 67057E+01	1. 88299E+01			
8. 00000E+01	1. 23054E+01	1. 51946E+01	1. 76884E+01	1. 99376E+01			
7. 67082E+00	6. 67098E+00	8. 13604E+00	9. 35411E+00	1. 04121E+01			
8. 50000E+01	1. 33420E+01	1. 62721E+01	1. 87082E+01	2. 08242E+01			
8. 15025E+00	2. 00129E+01	2. 44081E+01	2. 80623E+01	3. 12363E+01			
9. 00000E+01	2. 66839E+01	3. 25441E+01	3. 74164E+01	4. 16484E+01			
8. 62967E+00	3. 33549E+01	4. 06802E+01	4. 67706E+01	5. 20605E+01			
5. 00000E+01							
4. 73611E+00							
1. 00000E+02							
9. 47222E+00							
1. 50000E+02							
1. 42083E+01							
2. 00000E+02							
1. 89444E+01							
2. 50000E+02							
2. 36808E+01							

↑ き裂深さ分割数、膜応力分割数、曲げ応力分割数

↑  $K_I$ を入力するためのき裂深さデータ。KIDATD=5なので5個入力している。

↑  $K_I$ データを入力するための膜応力データ。

↑ この膜応力に対応する  $K_I$ データを以下の行で入力する。

↑ 膜応力が70MPaのときの  $K_I$ データ。き裂深さデータと対応する順番で入力する。

↑ KIDATM=5なので、膜応力データおよび  $K_I$ データのセットを5セット入力する。

↑  $K_I$ データを入力するための曲げ応力データ。

↑ この曲げ応力に対応する  $K_I$ データを以下の行で入力す

↑ 曲げ応力が50MPaのときの  $K_I$ データ。き裂深さデータと対応する順番で入力する。

↑ KIDATT=5なので、曲げ応力データおよび  $K_I$ データのセットを5セット入力する。

初期き裂のアスペクト比分布 (指数分布) の入力 (#CRKBEX : No.22)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	指数分布の指数	ALMDB	F10.0	—	—

- ・ このカードセットは初期き裂のアスペクト比分布種類 (#FLAG (No.2), IASPT (No.16)) に 1 (指数分布) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・ LLNL の指数分布モデルでは、ALMDB=1.15 が採用されている。

#CRKBEX (No.22)

破壊靱性値  $K_{Ic}$  のユーザー入力 (#KICUD : No.23)

No.	コラム (行番号)	連続計 算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の入力データ数	IKICDV	I5	—	—
2	1-15 (2~)		破壊靱性値 $K_{Ic}$ を定義するための T-R <sub>TNDT</sub>	RTKIC (IKICDV)	F15.0	—	—
3	16-30 (2~)		上記 T-R <sub>TNDT</sub> における破壊靱性値 $K_{Ic}$	AKICUD (IKICDV)	F15.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>

- ・このカードセットは破壊靱性値  $K_{Ic}$  の評価式 (#FLAG (No.2), IKIC (No.23)) に3 (ユーザー入力分布) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・破壊靱性値  $K_{Ic}$  分布の分割区間数を IKICDV パラメータで指定し、No.2 ~No.3 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。
- ・T-R<sub>TNDT</sub> は値の小さいものから順に入力する必要がある。

#KICUD (No.23)

破壊靱性値  $K_{Ia}$  のユーザー入力 (#KIAUD : No.24)

No.	カラム (行番号)	連統計 算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)		破壊靱性値 $K_{Ia}$ の入力データ数	IKIADV	I5	—	—
2	1-15 (2~)	1	破壊靱性値 $K_{Ia}$ を定義するための T-RT <sub>NDT</sub>	RTKIA (IKICDV)	F15.0	—	—
3	16-30 (2~)		上記 T-RT <sub>NDT</sub> における破壊靱性値 $K_{Ia}$	AKIAUD (IKIADV)	F15.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>

・このカードセットは破壊靱性値  $K_{Ia}$  の評価式 (#FLAG (No.2), IKIA (No.24)) に3 (ユーザー入力分布) が指定された場合に入力する必要がある。

・破壊靱性値  $K_{Ia}$  分布の分割区間数を IKIADV パラメータで指定し、No.2 ~No.3 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。

・T-RT<sub>NDT</sub> は値の小さいものから順に入力する必要がある。

#KIAUD (No.24)

照射劣化のシフト量  $\Delta RT_{NDT}$  のユーザー入力 (#DRTUD : No.25)

No.	カラム (行番号)	連続計 算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)		$\Delta RT_{NDT}$ の入力データ数	IDRTDV	I5	—	—
2	1-15 (2~)	1	$\Delta RT_{NDT}$ を定義するためのフルエンス	FLUDRT (IDRTDV)	F15.0	n/cm <sup>2</sup>	n/cm <sup>2</sup>
3	16-30 (2~)		上記フルエンスにおける $\Delta RT_{NDT}$	ADRTUD (IDRTDV)	F15.0	°F	°C

- ・このカードセットは  $\Delta RT_{NDT}$  の評価式 (#FLAG (No.2), IDRTR (No.25)) に 5 (ユーザー入力分布) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・  $\Delta RT_{NDT}$  分布の分割区間数を IDRTDV パラメータで指定し、No.2 ~No.3 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。
- ・フルエンスは値の小さいものから順に入力する必要がある。

#DRTUD (No.25)

中性子照射量減衰のユーザー入力 (#FDRUD : No.26)

No.	コラム (行番号)	連続計 算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	中性子減衰量のデータ入力点数	IFDRDV	I5	—	—
2	1-15 (2~)		中性子減衰量を定義するための肉厚方向深さ比	DEPFDR (IFDRDV)	F15.0	肉厚に対する割合 (%)	
3	16-30 (2~)		定義した肉厚方向深さにおける中性子減衰量	AFDRUD (IFDRDV)	F15.0	容器内表面の中性子照射量を 1.0としたときの割合 (%)	

- ・ このカードセットは中性子照射有無の選択 (#FLAG (No.2), IRRAD (No.8)) に3 (ユーザー入力分布) が指定された場合に入力する必要がある。
- ・ 中性子減衰分布の分割区間数を IFDRDV パラメータで指定し、No.2 ~No.3 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。
- ・ 肉厚方向深さ比は値の小さいものから順に入力する必要がある。

#FDRUD (No.26)



非破壊検査パラメータ (LLNL モデル) の入力 (#EXAMLL: No.27)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	LLNL モデルのパラメータ $D_B$ の値	EXLLBM	F10.0	inches	mm
2	11-20 (1)	2	LLNL モデルのパラメータ $\nu$ の値	EXLLNU	F10.0	—	—
3	21-30 (1)	3	LLNL モデルのパラメータ $a^*$ の値	EXLLAS	F10.0	inches	mm
4	31-40 (1)	4	LLNL モデルのパラメータ $\epsilon$ の値	EXLLEP	F10.0	—	—

- ・ このカードセットは非破壊検査有無の選択 (#FLAG (No.2), IISI (No.11)) において 12 (LLNL モデル) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・ LLNL のモデルでは、以下の値が用いられている。

パラメータ  $D_B$  (超音波ビーム径) = 25.4 mm

$\nu = 1.33$

$a^* = 6.35 \text{ mm}$

$\epsilon = 0.005$

R6法のパラメータの入力 (#R6: No.28)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	R6法のオプション	IOPTON	I5	—	—
2	6-10 (1)	2	R6法のカテゴリ	ICTGRY	I5	—	—
3	11-20 (1)	3	破壊評価曲線のLrの最大値	ALRMX	F10.0	—	—
4	21-25 (1)	4	Kr評価法選択フラグ0: 現在使用しない 1: 1次応力に内圧応力、2次応力に熱応力	KRFLG	I5	—	—
5	26-30 (1)	5	Lr評価法選択フラグ 0: 両端ピン支持式 1: 両端固定支持式	ILRFLG	I5	—	—
6	31-35 (1)	6	J-R曲線選択フラグ 0: データテーブルを使用 1: J-R曲線(国内)を使用 2: J-R曲線(米国NUREG/CR-5729)を使用	JRFLG	I5	—	—
7	1-10 (2)	7	K <sub>0</sub> の標準偏差	FKOSIG	F10.0	—	—
8	11-20 (2)	78	K <sub>0</sub> の標準偏差の打ち切り割合	TKOSIG	F10.0	—	—
9	21-25 (2)	9	破壊評価線図出力判定フラグ 0: データ出力せず 1: データ出力	I66FLG	I5	—	—
10	1-10 (3)	10	J-R曲線を評価する際に用いるシャルピー上部棚吸収エネルギー	USEJR	F10.0	J	J
11	11-20 (3)	11	J-R曲線を一定値に変更するΔaの値	CUTJR	F10.0	mm	mm

・このカードセットは破壊クラリティア (#FLAG (No.2), ICRITN (No.26)) に1 (R6法) が選択された場合に入力する必要がある。

・R6法のオプションには1と2を、R6法のカテゴリには1と2と3を選択することが可能である。

・No.10およびNo.11は、J-R曲線に国内曲線が採用された場合に入力する必要がある。

#R6 (No.28)

R6 法オプション2 の応力歪み曲線データの入力 (#R6OPT2 : No.29)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	降伏応力	SIGMAY	F10.0	ksi	MPa
2	1-5 (2)	2	応力歪み曲線の入力点数	ISSDV	I5	—	—
3	1-10 (3~)		応力の値	OPT2SIG (ISSDV)	F10.0	ksi	MPa
4	11-20 (3~)		歪みの値	OPT2EPS (ISSDV)	F10.0	—	—

・このカードセットは破壊クラテリア (#FLAG (No.2), ICRITN (No.26)) に 1 (R6 法) が選択され、R6 法のオプション (#R6 (No.28), IOPTON (No.1)) に 2 (R6 法オプション2 を使用) が選択された場合に入力する必要がある。

・応力歪み曲線の入力点数を ISSDV パラメータで指定し、No.3 ~No.4 のカードについては、それと同数を入力する必要がある。

#R6OPT2 (No.29)

R6 法カテゴリ-2, 3 で使用する  $K_0$  分布の入力 (#R6KOMG : No.30)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	カテゴリ-2, 3 からカテゴリ-1 へ変化させる値	CTCHNG	F10.0	—	—
2	1-5 (2)		$K_0$ を入力する際の温度分割数	ITMPDV	I5	—	—
3	6-10 (2)		$K_0$ を入力する際のき裂進展量 $\Delta a$ の分割数	IDTADV	I5	—	—
4	1-50 (3~)	2	き裂進展量 $\Delta a$ の値	DTAKOG (IDTADV)	F10.0	inches	mm
5	1-10 (不定)		温度の値	TMPKOG (IDTADV)	F10.0	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$
6	1-50 (不定)		温度と $\Delta a$ から算出された $K_0$ の値	AKOMG (ITMPDV, IDTADV)	F10.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>

- ・ このカードセットは破壊クライテリア (#FLAG (No.2), ICRITN (No.26)) に 1 (R6 法) が選択され、R6 法のカテゴリ- ( #R6 (No.28), ICTGRY (No.2)) に 2 または 3 (R6 法カテゴリ-2 または 3 を使用) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・ カードの入力順序は温度分布の時刻歴入力 (#TEMP, No.5) と類似している。入力順序については #TEMP での記述が参考になる。

#R6KOMG (No.30)

R6法カタゴリ-2の $K_0$ の最大値の入力 (#R6CTG2 : No.31)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	温度分割数	IC2KMX	I5	—	—
2	1-10 (2~)		$K_0$ の最大値を設定する温度	CT2TMP (IC2KMX)	F10.0	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$
3	11-20 (2~)		$K_0$ の最大値	AKOGMX (IC2KMX)	F10.0	ksi·inches <sup>1/2</sup>	MPa·m <sup>1/2</sup>

- ・このカードセットは破壊クライテリア (#FLAG (No.2), ICRIITN (No.26)) に1 (R6法) が選択され、R6法のカテゴリ- (#R6 (No.28), ICTGRY (No.2)) に2 (R6法カタゴリ-2を使用) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・ここでは $K_0$ の最大値を入力するのであるが、これと同様な設定はR6法カテゴリ-2,3で使用する $K_0$ 分布の入力 (#R6KOMG, No.30) でも行うことができる。

#R6CTG2 (No.31)

3次多項式応力分布の時刻歴入力 (#STRS3D : No.32) その1

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	軸方向き裂に作用する応力データベースの時刻分割数	NSTRESL	I5	—	—
2	1-10 (2~)		軸方向き裂に作用する応力データを入力するための時刻データ	TMFSTL (NSTRESL)	F10.0	minutes	minutes
3	11-25 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用する母材の応力の3次成分	S3DLB3 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
4	26-40 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用する母材の応力の2次成分	S3DLB2 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
5	41-55 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用する母材の応力の1次成分	S3DLB1 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
6	56-70 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用する母材の応力の0次成分	S3DLB0 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
7	71-85 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用するクラッドの応力の3次成分	S3DLC3 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
8	86-100 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用するクラッドの応力の2次成分	S3DLC2 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
9	101-115 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用するクラッドの応力の1次成分	S3DLC1 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
10	116-130 (2~)		定義時刻での、軸方向き裂に作用するクラッドの応力の0次成分	S3DLC0 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa

#STRS3D (No.32)

3 次多項式応力分布の時刻歴入力 (#STRS3D : No.32) その 2

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
11	1-5 (不定)	2	周方向き裂に作用する応力データベースの時刻分割数	NSTRESC	I5	—	—
12	1-10 (不定)		周方向き裂に作用する応力データを入力するための時刻データ	TMFSTC (NSTRESC)	F10.0	minutes	minutes
13	11-25 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用する母材の応力の 3 次成分	S3DCB3 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
14	26-40 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用する母材の応力の 2 次成分	S3DCB2 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
15	41-55 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用する母材の応力の 1 次成分	S3DCB1 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
16	56-70 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用する母材の応力の 0 次成分	S3DCB0 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
17	71-85 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用するクラッドの応力の 3 次成分	S3DCC3 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
18	86-100 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用するクラッドの応力の 2 次成分	S3DCC2 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
19	101-115 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用するクラッドの応力の 1 次成分	S3DCC1 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
20	116-130 (不定)		定義時刻での、周方向き裂に作用するクラッドの応力の 0 次成分	S3DCC0 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa

- ・ このカードセットは応力の評価方式 (#FLAG (No.2), ISTRES (No.4)) に 1 (3 次多項式分布) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・ 時刻分割数を入力した後、その分割数と同数の定義時刻データおよび応力データを入力する。軸方向き裂に作用する応力データについて全て入力した後、周方向き裂に作用する応力データを入力する。
- ・ 入力する応力は、「き裂に作用する応力」である。軸方向き裂に作用する応力は、压力容器の場合には一般的に周方向応力であり、周方向き裂に作用する応力は、压力容器の場合には一般的に軸方向応力である。取り違えないように注意を要する。
- ・ クラッドに対する応力は、クラッドを考慮していない場合は入力しなくても良い。

#STRS3D (No.32)

感度解析用連続計算機能 (#CONT : No.33)

・#CONT の入力例を以下に示す。

```

C-----10-----20-----30-----40-----50-----60
#CONT
$$SETSTART A5-STR3D-2.0
1 1
Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=2.0
3 3
2.0
$$SETEND
$$SETSTART A5-STR3D-1.0
1 1
Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=1.0
3 3
1.0
4 7
6
10.0 20.0 30.0 50.0 75.0
100.0
$$SETEND
C-----10-----20-----30-----40-----50-----60
#END
C-----10-----20-----30-----40-----50-----60

```

- ・#CONT は連続計算を行う必要がある場合に入力すれば良い。
- ・#CONT は入力カードの最後、「#END」の直前に記述しなければいけない。
- ・#CONT は「\$SETSTART」と「\$SETEND」ではさまれる複数の区間によって構成される。この「\$SETSTART」と「\$SETEND」の間の入力条件が1つのセットとして取り扱われ、入力カードが修正される。上記の例の場合は、2つの入力セットが存在している。
- ・\$SETSTART の後ろには、一文字スペースをはさみ、そのセットの解析結果を出力するファイル名を入力する。
- ・\$SETSTART 以下の行では、入力カードの変更を行いたいカードセットの No.と連続計算用データ No.を入力する。この番号はマニュアルに全て記載されている。例えば、解析タイトルを修正したいのならカードセット No.=1 (ANAME) であるし、フルエンスを修正したいのなら、カードセット No.=3

#CONT (No.33)



(#VESSEL)、データ No.=3 (FLUEC) になる。

- ・その次の行に、修正したいデータを入力する。これは、各データごとに入力フォーマットが異なるので、注意が必要である。入力フォーマットについては、各パラメータごとに本マニュアルに全て記載されている。
- ・時刻歴の温度分布を修正するような場合は、温度分布の全てを再入力する必要がある。どのパラメータを再入力する必要があるかについては、各パラメータの連続計算用データ No.を参照することにより把握できる。
- ・全ての修正箇所の記事が終了したら、最後に「\$SETEND」を入力する。「\$SETSTART」と「\$SETEND」の組 (カードセット) は複数入力することが可能であり、入力された回数だけ解析が繰り返される。
- ・#CONT で入力された変更内容は、全て初期の解析条件に対す変更内容として取り扱われる。つまり、#CONT の最初の「\$SETSTART」と「\$SETEND」の組で変更された内容は、#CONT の 2 番目以降の「\$SETSTART」と「\$SETEND」の組の解析条件には全く影響を与えない。
- ・#CONT の中で、#CONT 自身の内容を変更することはできない。つまり、#CONT で修正を行うカードセット No.に 33 (#CONT) を指定することはできない。

#CONT (No.33)

## 自動調整層別モンテカルロ法 (#SSAUTO : No.34)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	自動調整後の各階層の平均採点数	NSAMP2	I10	—	—
2	11-20 (1)	2	収束計算を行う場合の繰り返し計算の最大回数	IEPSMX	I10	—	—
3	21-30 (1)	3	収束計算を行う場合の収束判定値	CSEPSI	F10.0	—	—
4	31-40 (1)	4	各階層のき裂採点数のスムージングパラメータ	CSAMP	F10.0	—	—
5	41-50 (1)	5	深さ比方向の階層間隔のスムージングパラメータ	SSAMPD	F10.0	—	—
6	51-60 (1)	6	アスペクト比方向の階層間隔のスムージングパラメータ	SSAMP0	F10.0	—	—

- ・このカードセットは自動調整層別モンテカルロ法 (#FLAG (No.2), IPTY2 (No.31)) に 0 以外のパラメータが選択された場合に入力する必要がある。
- ・各階層のき裂採点数の最適化を行う場合は No.1~No.4 のパラメータが、深さ比方向の階層区間の自動分割を行う場合は No.1 および No.5 のパラメータが、アスペクト比方向の階層区間の自動分割を行う場合は No.1 および No.6 のパラメータが、それぞれ解析に用いられる。
- ・採点数の最適化を行う場合、自動調整後の各階層の平均採点数 (No.1) に基づき解が収束するまで採点を続ける。階層区間の最適化のみを行う場合は、最適化終了後、この平均採点数を用いた解析を 1 度だけ実施する。
- ・各階層のき裂採点数のスムージングパラメータとは、ある階層の採点数とその周囲の階層の採点数の比を調整するためのパラメータである。このパラメータは 1.0 以上の値を入力しなければならぬ。例えば 1.5 が入力されれば、ある階層の採点数とその周囲の階層の採点数の比は、最大 1.5 まで許容されることになる。採点数の比が 1.5 よりも大きい場合は、採点数の少ない階層の採点数を増やす。
- ・深さ比方向およびアスペクト比方向の階層間隔のスムージングパラメータとは、ある階層の間隔とその隣の階層の間隔の比を調整するためのパラメータである。このパラメータは 1.0 以上の値を入力しなければならぬ。例えば 1.1 が入力されれば、ある階層の間隔とその隣の階層の間隔の比は 1.1 程度の値になるように調整される。

相関係数の設定 (#CORREL : No.35)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	$K_{ic}$ - $K_{ia}$ の相関係数	CORKK	F10.0	-	-

- ・このカードセットは  $K_{ic}$  と  $K_{ia}$  の相関の考慮 (#FLAG (No.2), ICOREL (No.32)) に 1 (相関の考慮) が選択された場合に入力する必要がある。
- ・相関係数には 0.0 ~ 1.0 の値を入力しなければならない。

## 焼鈍および再脆化の情報の入力 (#ANNEAL : No.36)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	RT <sub>NDT</sub> 回復パーセント決定方式 0: 回復パーセントを入力 1: 入力条件からパーセントを算出	IANRFG	I5	—	—
2	6-10 (1)	2	シヤルピー上部棚吸収エネルギー回復パーセント決定方式 0: 回復パーセントを入力 1: 入力条件からパーセントを算出	IANUFG	I5	—	—
3	1-10 (2)	3	RT <sub>NDT</sub> 回復パーセント	ANRPT	F10.0	%	%
4	11-20 (2)	4	シヤルピー上部棚吸収エネルギー回復パーセント	ANUPT	F10.0	%	%
5	1-10 (3)	5	焼鈍温度	ANTEMP	F10.0	°F	°C
6	11-20 (3)	6	焼鈍温度持続時間	ANHOUR	F10.0	hours	hours
7	21-30 (3)	7	フラックスレート	ANFLRT	F10.0	n / (cm <sup>2</sup> s)	n / (cm <sup>2</sup> s)
8	31-40 (3)	8	中性子照射を受けている間の温度	TMPIRD	F10.0	°F	°C
9	41-50 (3)	9	照射をうけていないときのシヤルピー上部棚吸収エネルギー	USE	F10.0	J	J
10	1-10 (4)	10	焼鈍後の再照射量	REFLUE	F10.0	× 10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>	× 10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>

・このカードセットは焼鈍および再脆化の考慮 (#FLAG (No.2), IANNE (No.34)) に0以外の値が選択された場合に入力する必要がある。

・RT<sub>NDT</sub> 回復パーセントを入力する場合は、No.3のパーセントが有効になる。入力条件から算出する場合は焼鈍温度、焼鈍温度持続時間、フラックスレート、中性子照射を受けている間の温度から回復パーセントが算出される。

・シヤルピー上部棚吸収エネルギー回復パーセントを入力する場合は、No.4の値が有効になる。入力条件から算出する場合は、焼鈍温度、焼鈍温度持続時間、照射を受けていないときのシヤルピー上部棚吸収エネルギーから回復パーセントが算出される。

・上部棚特性値の回復パーセントはシヤルピー上部棚吸収エネルギーの回復パーセントを用いて算出される。

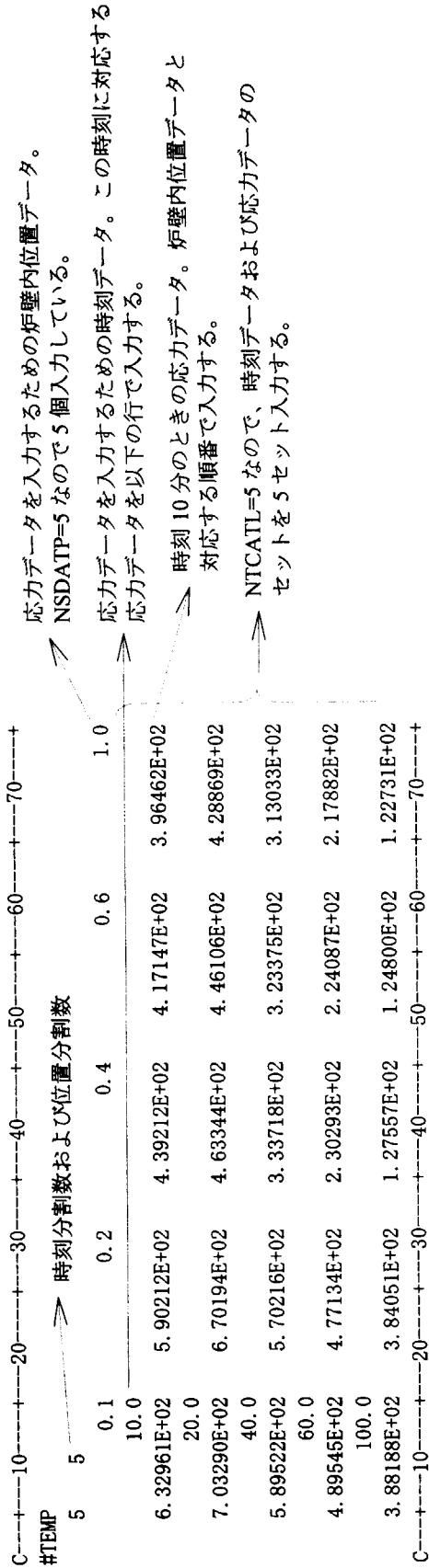
#ANNEAL (No.36)

応力のデータテーブル入力 (#STRSDT : No.37)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)		データを入力する際のトランジェント時間分割数	NSDAIT	I5	—	—
2	6-10 (1)		データを入力する際の容器肉厚方向深さ分割数	NSDAP	I5	—	—
3	1-75 (2~)	1	応力を定義する容器肉厚方向深さ	SDATP (NSDAP)	F15.0	肉厚の% ( x / thick)	肉厚の% ( x / thick)
4	1-15 (不定)		応力を定義するトランジェント時刻	SDAIT (NSDAIT)	F15.0	min	min
5	1-78 (不定)		離散点応力	STRDAT(NSDAIT, NSDAP)	F15.0	ksi	MPa

・このカードセットは応力の評価方式 (#FLAG (No.2), ISTRES (No.4)) に 2 ( 離散点入力 (データテーブル) ) が選択された場合に入力する必要がある。

・#STRSDT の入力例を以下に示す。



#STRSDT (No.37)

残留応力分布の入力 (#RESSTR : No.38)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-15 (1)	1	軸方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 3 次項の係数	RSTLB3	F15.5	ksi	MPa
2	16-30 (1)		軸方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 2 次項の係数	RSTLB2	F15.5	ksi	MPa
3	31-45 (1)		軸方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 1 次項の係数	RSTLB1	F15.5	ksi	MPa
4	46-60 (1)		軸方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 0 次項の係数	RSTLB0	F15.5	ksi	MPa
5	61-75 (1)		軸方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 3 次項の係数	RSTLC3	F15.5	ksi	MPa
6	76-90 (1)		軸方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 2 次項の係数	RSTLC2	F15.5	ksi	MPa
7	91-105 (1)		軸方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 1 次項の係数	RSTLC1	F15.5	ksi	MPa
8	106-120 (1)		軸方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 0 次項の係数	RSTLC0	F15.5	ksi	MPa
9	1-15 (2)	2	周方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 3 次項の係数	RSTCB3	F15.5	ksi	MPa
10	16-30 (2)		周方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 2 次項の係数	RSTCB2	F15.5	ksi	MPa
11	31-45 (2)		周方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 1 次項の係数	RSTCB1	F15.5	ksi	MPa
12	46-60 (2)		周方向き裂の母材に作用する残留応力分布の 0 次項の係数	RSTCB0	F15.5	ksi	MPa
13	61-75 (2)		周方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 3 次項の係数	RSTCC3	F15.5	ksi	MPa
14	76-90 (2)		周方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 2 次項の係数	RSTCC2	F15.5	ksi	MPa
15	91-105 (2)		周方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 1 次項の係数	RSTCC1	F15.5	ksi	MPa
16	106-120 (2)		周方向き裂のクラッドに作用する残留応力分布の 0 次項の係数	RSTCC0	F15.5	ksi	MPa

・このカードセットは残留応力の考慮 (#FLAG (No.2), IRSTRS (No.35)) に 1 (残留応力を考慮) が選択された場合に入力する必要がある。  
 ・クラッドを考慮していない場合は、クラッド部に作用する残留応力分布の入力を省略しても良い。

#RESSTR (No.38)

初期き裂深さおよび長さの固定値の入力 (#CRKFIX : No.39)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	初期き裂深さの固定値	FIXDEP	F10.0	inches	m
2	11-20 (2)	2	初期き裂半長の固定値	FIXLNG	F10.0	inches	m

- ・このカードセットはき裂種類 (#FLAG (No.2), ICRACK (No.13)) に 10 (無限長さ裂 (深さ固定)) または 11 (半楕円き裂 (深さ&長さ固定)) が選択された場合に入力する必要はある。
- ・無限長さ裂を対象とする場合は、初期き裂半長の固定値として入力された値は無視される。

#CRKFIX (No.39)

非破壊検査 (荒川式) のパラメータの入力 (#EXAMAR : No.40)

No.	コラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	探傷方法毎に定まる定数 (パラメータ I)	CONSL	F10.0	dB	dB
2	11-20 (1)	2	平滑面と割れ面のエコー高さの差の平均値 (パラメータ $(20\log Ec)_{ave}$ )	AMYUR	F10.0	dB	dB
3	21-30 (1)	3	正規分布確率の標準偏差値 (パラメータ $\sigma$ )	SIGMAR	F10.0	dB	dB
4	31-40 (1)	4	検出レベル (パラメータ $L_0$ )	CONSL0	F10.0	dB	dB
5	41-50 (1)	5	超音波の波長 (パラメータ $\lambda$ )	ALAMBDA	F10.0	inches	mm
6	1-10 (2)	6	対比傷の横穴の径 (パラメータ $t_H$ )	CONSTH	F10.0	inches	mm
7	11-20 (2)	7	タンデム探傷に用いた探触子の屈折角 (パラメータ $\theta$ )	THETAD	F10.0	°	°

・このカードセットは非破壊検査有無の選択 (#FLAG (No.2), HSI (No.11)) に 13 ( ) が選択された場合に入力する必要がある。  
 ・圧力容器の表面き裂を対象とした場合、以下のパラメータが用いられている

- I : 10dB
- $(20\log Ec)_{ave}$  : -7.5dB
- $\sigma$  : 2.67dB
- $L_0$  : -14dB
- $\lambda$  : 1.615mm
- $t_H$  : 7.9mm
- $\theta$  : 45 度

#EXAMAR (No.40)



クラッド付き無限長き裂の応力拡大係数の切り替え寸法の入力 (#CLADK : No.41)

No.	カードセット (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10 (1)	1	き裂の切り替え寸法	AOTCR	F10.0	—	—

- ・このカードセットは(#FLAG (No.2), IISI (No.11)) のフラッグ ISIFA=34,35,44,45 のときに用いられる。
- ・このカードセットの入力は省略する場合、以下のデフォルト値が用いられている。  
 軸方向き裂に関して、AOTCR=0.5  
 周方向き裂に関して、AOTCR=0.15

#CLADK (No.41)

### 3. 2 入力フラグと必要なカードセットとの対応

以下の典型的な解析ケースに対して、解析する際に必要な入力フラグと入力カードセットについて説明する。

- ・事例 1：軸方向無限長さ裂
- ・事例 2：周方向無限長さ裂
- ・事例 3：半楕円き裂（アスペクト比固定）
- ・事例 4：半楕円き裂（アスペクト比の分布も考慮）
- ・事例 5：焼鈍を考慮した事例
- ・事例 6：R6 法を考慮した事例

解析条件としては、NRC/EPRI ベンチマーク解析条件を用いる。

#### 3.2.1 NRC/EPRI ベンチマーク解析の解析条件

本節及び次節の入力データ例に関する説明では、解析条件に関して全て NRC/EPRI ベンチマーク解析条件を用いるとしているため、ここで NRC/EPRI ベンチマーク解析条件についてまとめる。

NRC/EPRI のベンチマーク解析は NRC と EPRI 主催の、異なる解析コードの比較、標準的解析手法の提案、確率論的破壊力学解析コードによる解析の練習などを目的としたベンチマーク解析である。

解析対象となる事象は、加圧水型軽水炉の原子炉圧力容器の加圧熱衝撃（PTS）事象である。ベンチマークでは3回に分けて計 13 ケースの問題が提出された。問題では基本的に入力データだけが与えられ解析の手法については規定されないが、第3回の解析では先の2回の解析結果に基づき、計算結果のばらつきを最小限にするために解析手法についても一部規定が設けられた。

##### (1) 基本パラメータ

圧力容器形状及びトランジェントなどの基本パラメータを表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 NRC/EPRI ベンチマーク解析の基本パラメータ

容器寸法	
容器内半径 (m)	2.2860
容器肉厚 (m)	0.2286
クラッド	なし
水温・内圧履歴	
初期水温 (°C)	288.0
最終水温 (°C)	65.6
冷却速度 (sec <sup>-1</sup> )	0.0025
内圧 (MPa)	6.895 (一定)
熱伝導解析物性値	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7833
比熱 (J/kg·K)	502.4
熱伝導率 (W/m·K)	41.54
熱伝達係数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	1817.0
熱応力解析物性値	
ヤング率 (MPa)	1.9306 × 10 <sup>5</sup>
ポアソン比	0.3
熱膨張係数 (K <sup>-1</sup> )	1.446 × 10 <sup>-5</sup>

## (2) 初期き裂など

- ・き裂の方向 : 軸方向および周方向
- ・き裂の形状 : 無限長き裂
- ・応力拡大係数 : 内表面き裂に対して、線形破壊力学を用いた計算式
- ・き裂深さの分布 : 離散型のオリジナルの OCTAVIA 分布、  
き裂の非検出確率は考慮せず。

## (3) 照射脆化

- ・初期  $RT_{NDT}$  : 正規分布、平均値は -6.667°C、標準偏差は CaseA0/B0 で 8.333°C、それ以外で 9.444°C
- ・銅含有量 : 正規分布。平均値は 0.30Wt.%、標準偏差は 0.25Wt.%。
- ・ニッケル含有量 : 0.75Wt.% で一定。
- ・容器内表面フルエンス : 正規分布。標準偏差は平均値の 30%。
- ・容器板厚方向のフルエンスの減衰 :

$$F(x) = F_{ID} \cdot e^{-12.992x} \quad (\text{Guthrie の減衰式})$$

$$F(x) = F_{ID} \cdot e^{-9.449x} \quad (\text{RG 1.99 Rev.2 の減衰式})$$

ここで、 $x$  は容器内表面からの深さ( $m$ )である。

・  $\Delta RT_{NDT}$  の平均値の計算式：

$$\Delta RT_{NDT} = [-2.68 + 264Cu + 248Cu \cdot Ni] f^{0.218} \quad (\text{Guthrie の脆化予測式})$$

$$\Delta RT_{NDT} = [CF] f^{(0.28 - 0.10 \log_{10} f)} \quad (\text{RG 1.99 Rev.2 の脆化予測式})$$

ここで、 $f$  は中性子フルエンスを  $10^{19}$  で割った値、 $CF$  は溶接部に対する化学成分係数で、 $0.3wt.\%Cu$  と  $0.75wt.\%Ni$  に対しては  $120.7$  である。標準偏差はゼロとする。

#### (4) 破壊靱性

- ・ き裂進展開始破壊靱性  $K_{IC}$  ( $MPa\sqrt{m}$ ) : NRC 平均曲線、標準偏差は  $0.10K_{IC}$
- ・ き裂停止破壊靱性  $K_{Ia}$  ( $MPa\sqrt{m}$ ) : NRC 平均曲線、標準偏差は  $0.10K_{Ia}$
- ・ 上部棚靱性 :  $219.8MPa\sqrt{m}$  とする。

#### (5) 破壊のクライテリア

- ・ き裂の再進展と停止を計算する。き裂深さが板厚の 100%に達する前にき裂の停止が生じない場合には、容器は破壊する。
- ・ 残りのリガメントに対する内圧による応力が流動応力の  $551.6MPa$  を超えた場合には容器は破壊する。
- ・ 高温予荷重の効果は考慮しない。

#### (6) 第1回ベンチマーク問題

- ・ Case A0 : 軸方向き裂と Guthrie の脆化予測式とフルエンス減衰式
- ・ Case B0 : 周方向き裂と Guthrie の脆化予測式とフルエンス減衰式
- ・ Case A1 : 軸方向き裂と RG 1.99 Rev.2 の脆化予測式とフルエンス減衰式
- ・ Case B1 : 周方向き裂と RG 1.99 Rev.2 の脆化予測式とフルエンス減衰式

#### (7) 第2回ベンチマーク問題

- ・ Case A2 : 軸方向き裂と Case A1 の脆化予測法を用い、き裂分布を除く全ての不確実性をゼロとする。(き裂深さ以外は確定値)
- ・ Case B2 : 周方向き裂と Case B1 の脆化予測法を用い、き裂分布を除く全ての不確実性をゼロとする。

- ・ Case A3 : 軸方向き裂と Case A1 の脆化予測法を用い、最終冷却温度を 150°C から 200°C とする。
- ・ Case B3 : 軸方向き裂と Case B1 の脆化予測法を用い、最終冷却温度を 150°C から 200°C とする。

#### (8) 第3回ベンチマーク問題

第1回、第2回のベンチマーク解析を通じて、解析コード間の計算手法の違いによる結果の違いが明らかとなった。第3回のベンチマーク解析では、これらの違いをなるべく少なくするために、以下の解析条件が付け加えられた。

- ・ 各フルエンス毎に、1,000,000 回のシミュレーションあるいは 10 以上の破壊が生じるまで解析を行う。
- ・ 初期  $RT_{NDT}$ 、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  の偏差は板厚方向に一定とする。
- ・ 初期欠陥分布には連続分布を用いず、離散的な分布とする。
- ・ 分布の打ち切りを行う場合には、打ち切りの限界を平均値のプラス/マイナス 5 倍とする。

主な解析ケースを以下に示す。

- ・ Case A5/B5 : 軸および周方向き裂で Octavia のき裂深さの分布の代わりに、検査を考慮しない Marshall のき裂分布を用いる。
- ・ Cases A6/B6 : 軸および周方向き裂で、上部棚破壊靱性を  $219.8 \text{ MPa}\sqrt{m}$  から  $164.9 \text{ MPa}\sqrt{m}$  とする。
- ・ Case A7 : 長さ : 深さの比が 6:1 の軸方向半楕円表面き裂を用いる。き裂進展停止には無限長の応力拡大係数の値を除く。
- ・ Case B8 : 周方向き裂で、非破壊のクライテリアを板厚の 100% 以下から 75% 位以下とする。
- ・ Case A9/B9 : 表面き裂の代わりに、軸および周方向のランダムに分布した埋没欠陥を用いる。
- ・ Cases A10/B10 : 軸および周方向き裂で、残留応力を考慮する。残留応力の分布は以下のものである。

$$\sigma(x) = \sigma_0 \cos(2\pi x/t)$$

ここで、 $\sigma_0$  は内表面での残留応力で  $55.16 \text{ MPa}$ 、 $x$  は内表面からの深さ ( $m$ )、 $t$  は容器板厚で  $0.2286m$  である。

- ・ Case A11/B11 : 軸および周方向き裂で、クラッドの影響を考慮する。クラッドによる熱応力計算に必要なパラメータは以下の通り。
- ・ Case B12 : ブルーム領域に位置する周方向き裂

クラッド厚さ	$5.588 \times 10^{-3} m$
クラッド熱膨張係数	$1.8 \times 10^{-5} \text{C}^{-1}$
クラッドヤング率	$1.86 \times 10^{11} Pa$
クラッドポアソン比	0.3
クラッド応力解放温度	288°C
母材熱膨張係数	$1.44 \times 10^{-5} \text{C}^{-1}$

### 3.2.2 各事例のフラグ及び入力カードセット一覧

ここで、典型的な解析ケースに対して、解析する際に必要な入力フラグと入力カードセットについて説明する。ただし、解析条件に関しては前述 NRC/EPRI ベンチマーク解析の解析条件を用いる。

各事例のフラグ及びその内容説明に関しては表 3.2.2～表 3.2.7 にまとめ、これらのフラグに対応した入力カードセット及びその説明を表 3.2.8～表 3.2.13 にまとめる。

表 3.2.2 解析事例 1 の主なフラグ及びその内容説明

No.	変数名	フラグ及びその内容説明	
1	IANA	解析種類	0: 確率論的解析
2	IINPT	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)
3	IOUTPT	出力単位系	1: 国際単位系 (SI)
4	ISTRES	応力の評価方式	1: 3次多項式分布
5	ITEMP	温度の評価方式	0: データテーブル
6	IPRES	内圧の評価方式	0: 4次多項式分布
7	INTARP	温度及び応力の補間方式	0: 線形補間 (1次)
8	IRRAD	中性子照射の選択	1: 有り (部材内は指数減衰)
9	ICLAD	クラッド有無の選択	0: クラッド無し
10	IWPS	高温予荷重効果有無の選択	0: 無し
11	IISI	非破壊検査 (ISI) 有無の選択	0: 無し
12	IWELD	き裂の存在位置	0: 溶接部
13	ICRACK	き裂種類	0: 無限長き裂
14	IORIN	き裂配置方向	1: 軸方向き裂
15	IDEPT	初期き裂の深さ分布種類	0: Marshall 分布 (指数分布)
16	IASPT	初期アスペクト比分布種類	(本事例では使用しない)
17	IPLANE	半楕円き裂き裂平面の定義	(本事例では使用しない)
18	ISIFA	無限長き裂の応力拡大係数	23: VISA-II の軸方向き裂式 (3次多項式用)
19	ISIFB	半楕円き裂の応力拡大係数	(本解析事例では使用しない)
20	ISIFI		使用しない
21	I PROG	偏差再計算評価方式	0: VISA-II の評価方式
22	IFINIT	半楕円き裂の進展方式	(本解析事例では使用しない)
23	IKIC	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
24	IKIA	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
25	IDRTR	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式	1: 米国 RG1.99 Rev.2 式
26	ICRITN	破壊クライテリア	0: $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$ クライテリア 及び塑性崩壊基準
27	IGRAPH	計算結果の出力	0: 結果ファイルを出力する。 詳細情報ファイルは出力しない
31	IPTY2	自動調整層別モンテカルロ法	0: 自動調整を行わない
32	ICOREL	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関の考慮	0: 相関を考慮しない
33	IDUSE	フルエンスによる上部靱性値低下予測	0: 考慮しない
34	IANNE	焼鈍および再脆化の考慮	0: 考慮しない
35	IRSTRS	残留応力の考慮	0: 残留応力を考慮しない
36	ISBSFG	逐次膜曲げ変換手法	0: 実施しない

表 3.2.3 解析事例 2 の主なフラグ及びその内容説明

No.	変数名	フラグ及びその内容説明	
1	IANA	解析種類	0: 確率論的解析
2	IINPT	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)
3	IOUTPT	出力単位系	1: 国際単位系 (SI)
4	ISTRES	応力の評価方式	1: 3次多項式分布
5	ITEMP	温度の評価方式	0: データテーブル
6	IPRES	内圧の評価方式	0: 4次多項式分布
7	INTARP	温度及び応力の補間方式	0: 線形補間 (1次)
8	IRRAD	中性子照射の選択	1: 有り (部材内は指数減衰)
9	ICLAD	クラッド有無の選択	0: クラッド無し
10	IWPS	高温予荷重効果有無の選択	0: 無し
11	IISI	非破壊検査 (ISI) 有無の選択	0: 無し
12	IWELD	き裂の存在位置	0: 溶接部
13	ICRACK	き裂種類	0: 無限長き裂
14	IORIN	き裂配置方向	0: 周方向き裂
15	IDEPT	初期き裂の深さ分布種類	0: Marshall 分布 (指数分布)
16	IASPT	初期アスペクト比分布種類	(本事例では使用しない)
17	IPLANE	半楕円き裂き裂平面の定義	(本事例では使用しない)
18	ISIFA	無限長き裂の応力拡大係数	13: VISA-II の周方向き裂式 (3次多項式用)
19	ISIFB	半楕円き裂の応力拡大係数	(本解析事例では使用しない)
20	ISIFI		使用しない
21	Iprog	偏差再計算評価方式	0: VISA-II の評価方式
22	IFINIT	半楕円き裂の進展方式	(本解析事例では使用しない)
23	IKIC	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
24	IKIA	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
25	IDRTR	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式	1: 米国 RG1.99 Rev.2 式
26	ICRITN	破壊クライテリア	0: $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$ クライテリア 及び塑性崩壊基準
27	IGRAPH	計算結果の出力	0: 結果ファイルを出力する。 詳細情報は出力しない
31	IPTY2	自動調整層別モンテカルロ法	0: 自動調整を行わない
32	ICOREL	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関の考慮	0: 相関を考慮しない
33	IDUSE	フルエンスによる上部靱性値低下予測	0: 考慮しない
34	IANNE	焼鈍および再脆化の考慮	0: 考慮しない
35	IRSTRS	残留応力の考慮	0: 残留応力を考慮しない
36	ISBSFG	逐次膜曲げ変換手法	0: 実施しない



表 3.2.4 解析事例 3 の主なフラグ及びその内容説明

No.	変数名	フラグ及びその内容説明	
1	IANA	解析種類	0: 確率論的解析
2	IINPT	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)
3	IOUTPT	出力単位系	1: 国際単位系 (SI)
4	ISTRES	応力の評価方式	1: 3次多項式分布
5	ITEMP	温度の評価方式	0: データテーブル
6	IPRES	内圧の評価方式	0: 4次多項式分布
7	INTARP	温度及び応力の補間方式	0: 線形補間 (1次)
8	IRRAD	中性子照射の選択	1: 有り (部材内は指数減衰)
9	ICLAD	クラッド有無の選択	0: クラッド無し
10	IWPS	高温予荷重効果有無の選択	0: 無し
11	IISI	非破壊検査 (ISI) 有無の選択	0: 無し
12	IWELD	き裂の存在位置	0: 溶接部
13	ICRACK	き裂種類	3: アスペクト比固定半楕円き裂
14	IORIN	き裂配置方向	1: 軸方向き裂
15	IDEPT	初期き裂の深さ分布種類	0: Marshall 分布 (指数分布)
16	IASPT	初期アスペクト比分布種類	(本事例では使用しない)
17	IPLANE	半楕円き裂き裂平面の定義	(本事例では使用しない)
18	ISIFA	無限長き裂の応力拡大係数	23: VISA-II の軸方向き裂式 (3次多項式用)
19	ISIFB	半楕円き裂の応力拡大係数	22: 軸方向き裂の白鳥式
20	ISIFI		使用しない
21	I PROG	偏差再計算評価方式	0: VISA-II の評価方式
22	IFINIT	半楕円き裂の進展方式	3: 両方向に独立に進展・停止
23	IKIC	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
24	IKIA	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
25	IDRTR	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式	1: 米国 RG1.99 Rev.2 式
26	ICRITN	破壊クライテリア	0: $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$ クライテリア 及び塑性崩壊基準
27	IGRAPH	計算結果の出力	0: 結果ファイルを出力する。 詳細情報は出力しない
31	IPTY2	自動調整層別モンテカルロ法	0: 自動調整を行わない
32	ICOREL	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関の考慮	0: 相関を考慮しない
33	IDUSE	フルエンスによる上部靱性値低下予測	0: 考慮しない
34	IANNE	焼鈍および再脆化の考慮	0: 考慮しない
35	IRSTRS	残留応力の考慮	0: 残留応力を考慮しない
36	ISBSFG	逐次膜曲げ変換手法	0: 実施しない

表 3.2.5 解析事例 4 の主なフラグ及びその内容説明

No.	変数名	フラグ及びその内容説明	
1	IANA	解析種類	0: 確率論的解析
2	IINPT	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)
3	IOUTPT	出力単位系	1: 国際単位系 (SI)
4	ISTRES	応力の評価方式	1: 3次多項式分布
5	ITEMP	温度の評価方式	0: データテーブル
6	IPRES	内圧の評価方式	0: 4次多項式分布
7	INTARP	温度及び応力の補間方式	0: 線形補間 (1次)
8	IRRAD	中性子照射の選択	1: 有り (部材内は指数減衰)
9	ICLAD	クラッド有無の選択	0: クラッド無し
10	IWPS	高温予荷重効果有無の選択	0: 無し
11	IISI	非破壊検査 (ISI) 有無の選択	0: 無し
12	IWELD	き裂の存在位置	0: 溶接部
13	ICRACK	き裂種類	1: 深さ、アスペクト比に分布を持った半楕円き裂
14	IORIN	き裂配置方向	1: 軸方向き裂
15	IDEPT	初期き裂の深さ分布種類	0: Marshall 分布 (指数分布)
16	IASPT	初期アスペクト比分布種類	0: 対数正規分布
17	IPLANE	半楕円き裂き裂平面の定義	0: 初期き裂平面の自動分割
18	ISIFA	無限長き裂の応力拡大係数	23: VISA-II の軸方向き裂式 (3次多項式用)
19	ISIFB	半楕円き裂の応力拡大係数	22: 軸方向き裂の白鳥式
20	ISIFI		使用しない
21	IPROG	偏差再計算評価方式	0: VISA-II の評価方式
22	IFINIT	半楕円き裂の進展方式	3: 両方向に独立に進展・停止
23	IKIC	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
24	IKIA	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
25	IDRTR	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式	1: 米国 RG1.99 Rev.2 式
26	ICRITN	破壊クライテリア	0: $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$ クライテリア及び塑性崩壊基準
27	IGRAPH	計算結果の出力	0: 結果ファイルを出力する。詳細情報は出力しない
31	IPTY2	自動調整層別モンテカルロ法	0: 自動調整を行わない
32	ICOREL	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関の考慮	0: 相関を考慮しない
33	IDUSE	フレックスによる上部靱性値低下予測	0: 考慮しない
34	IANNE	焼鈍および再脆化の考慮	0: 考慮しない
35	IRSTRS	残留応力の考慮	0: 残留応力を考慮しない
36	ISBSFG	逐次膜曲げ変換手法	0: 実施しない

表 3.2.6 解析事例 5 の主なフラグ及びその内容説明

No.	変数名	フラグ及びその内容説明	
1	IANA	解析種類	0: 確率論的解析
2	IINPT	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)
3	IOUTPT	出力単位系	1: 国際単位系 (SI)
4	ISTRES	応力の評価方式	1: 3次多項式分布
5	ITEMP	温度の評価方式	0: データテーブル
6	IPRES	内圧の評価方式	0: 4次多項式分布
7	INTARP	温度及び応力の補間方式	0: 線形補間 (1次)
8	IRRAD	中性子照射の選択	1: 有り (部材内は指数減衰)
9	ICLAD	クラッド有無の選択	0: クラッド無し
10	IWPS	高温予荷重効果有無の選択	0: 無し
11	IISI	非破壊検査 (ISI) 有無の選択	0: 無し
12	IWELD	き裂の存在位置	0: 溶接部
13	ICRACK	き裂種類	0: 無限長き裂
14	IORIN	き裂配置方向	1: 軸方向き裂
15	IDEPT	初期き裂の深さ分布種類	0: Marshall 分布 (指数分布)
16	IASPT	初期アスペクト比分布種類	(本事例では使用しない)
17	IPLANE	半楕円き裂き裂平面の定義	(本事例では使用しない)
18	ISIFA	無限長き裂の応力拡大係数	23: VISA-II の軸方向き裂式 (3次多項式用)
19	ISIFB	半楕円き裂の応力拡大係数	(本解析事例では使用しない)
20	ISIFI		使用しない
21	IPROG	偏差再計算評価方式	0: VISA-II の評価方式
22	IFINIT	半楕円き裂の進展方式	(本解析事例では使用しない)
23	IKIC	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
24	IKIA	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
25	IDRTR	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式	1: 米国 RG1.99 Rev.2 式
26	ICRITN	破壊クライテリア	0: $K_{Ic}$ - $K_{Ia}$ クライテリア 及び塑性崩壊基準
27	IGRAPH	計算結果の出力	0: 結果ファイルを出力する。 詳細情報ファイルは出力しない
31	IPTY2	自動調整層別モンテカルロ法	0: 自動調整を行わない
32	ICOREL	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関の考慮	0: 相関を考慮しない
33	IDUSE	フレンスによる上部靱性値低下予測	0: 考慮しない
34	IANNE	焼鈍および再脆化の考慮	1: $RT_{NDT}$ に対する効果を考慮
35	IRSTRS	残留応力の考慮	0: 残留応力を考慮しない
36	ISBSFG	逐次膜曲げ変換手法	0: 実施しない

表 3.2.7 解析事例 6 の主なフラグ及びその内容説明

No.	変数名	フラグ及びその内容説明	
1	IANA	解析種類	0: 確率論的解析
2	IINPT	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)
3	IOUTPT	出力単位系	1: 国際単位系 (SI)
4	ISTRES	応力の評価方式	1: 3次多項式分布
5	ITEMP	温度の評価方式	0: データテーブル
6	IPRES	内圧の評価方式	0: 4次多項式分布
7	INTARP	温度及び応力の補間方式	0: 線形補間 (1次)
8	IRRAD	中性子照射の選択	1: 有り (部材内は指数減衰)
9	ICLAD	クラッド有無の選択	0: クラッド無し
10	IWPS	高温予荷重効果有無の選択	0: 無し
11	IISI	非破壊検査 (ISI) 有無の選択	0: 無し
12	IWELD	き裂の存在位置	0: 溶接部
13	ICRACK	き裂種類	0: 無限長き裂
14	IORIN	き裂配置方向	1: 軸方向き裂
15	IDEPT	初期き裂の深さ分布種類	0: Marshall 分布 (指数分布)
16	IASPT	初期アスペクト比分布種類	(本事例では使用しない)
17	IPLANE	半楕円き裂き裂平面の定義	(本事例では使用しない)
18	ISIFA	無限長き裂の応力拡大係数	23: VISA-II の軸方向き裂式 (3次多項式用)
19	ISIFB	半楕円き裂の応力拡大係数	(本解析事例では使用しない)
20	ISIFI		使用しない
21	IPROG	偏差再計算評価方式	1: FAVOR の評価方式
22	IFINIT	半楕円き裂の進展方式	(本解析事例では使用しない)
23	IKIC	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
24	IKIA	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の評価式	0: 米国 NRC の平均曲線
25	IDRTR	$\Delta RT_{NDT}$ の評価式	1: 米国 RG1.99 Rev.2 式
26	ICRITN	破壊クライテリア	1: R6 法
27	IGRAPH	計算結果の出力	0: 結果ファイルを出力する。 詳細情報は出力しない
31	IPTY2	自動調整層別モンテカルロ法	0: 自動調整を行わない
32	ICOREL	$K_{Ic}$ と $K_{Ia}$ の相関の考慮	1: 相関を考慮する
33	IDUSE	フルエンスによる上部靱性値低下予測	0: 考慮しない
34	IANNE	焼鈍および再脆化の考慮	0: 考慮しない
35	IRSTRS	残留応力の考慮	0: 残留応力を考慮しない
36	ISBSFG	逐次膜曲げ変換手法	0: 実施しない

表 3.2.8 解析事例 1 の入力カードセット及びその内容説明

No.	カードセット名	カードセットタイプ	カードセットの内容説明
1	#TITLE	O	解析タイトルの入力
2	#FLAG	M	解析の流れを制御するためのフラグ入力
3	#VESSEL	M	圧力容器のデータ入力
4	#TRANS	M	過渡事象のデータ入力
5	#TEMP	M	温度分布の時刻歴入力
6	#STRS3D	C	3次多項式応力分布の時刻歴入力
7	#PRESFM	O	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)
8	#CRACKA	O	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力
9	#CDEPTH	O	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力
10	#MATRAL	M	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力
11	#CNTPRM	O	解析経過の画面表示間隔の入力
12	#TBLPRM	O	表出力のデータ形式入力
13	#CONT	O	連続解析用データ入力
14	#END	M	入力データの終了

注: カードセットタイプの M は、このカードセットは必ず入力しなければならないことを意味する。O はこのカードセットは必要に応じて入力すればよいことを意味する。C は他のカードセットもあるが、このカードセットの使用を薦めることを意味する。

表 3.2.9 解析事例 2 の入力カードセット及びその内容説明

No.	カードセット名	カードセットタイプ	カードセットの内容説明
1	#TITLE	O	解析タイトルの入力
2	#FLAG	M	解析の流れを制御するためのフラグ入力
3	#VESSEL	M	圧力容器のデータ入力
4	#TRANS	M	過渡事象のデータ入力
5	#TEMP	M	温度分布の時刻歴入力
6	#STRS3D	C	3次多項式応力分布の時刻歴入力
7	#PRESFM	O	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)
8	#CRACKA	O	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力
9	#CDEPTH	O	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力
10	#MATRAL	M	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力
11	#CNTPRM	O	解析経過の画面表示間隔の入力
12	#TBLPRM	O	表出力のデータ形式入力
13	#CONT	O	連続解析用データ入力
14	#END	M	入力データの終了

表 3.2.10 解析事例 3 の入力カードセット及びその内容説明

No.	カードセット名	カードセットタイプ	カードセットの内容説明
1	#TITLE	O	解析タイトルの入力
2	#FLAG	M	解析の流れを制御するためのフラグ入力
3	#VESSEL	M	圧力容器のデータ入力
4	#TRANS	M	過渡事象のデータ入力
5	#TEMP	M	温度分布の時刻歴入力
6	#STRS3D	C	3次多項式応力分布の時刻歴入力
7	#PRESFM	O	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)
8	#CRACKA	O	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力
9	#CDEPTH	O	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力
10	#MATRAL	M	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力
11	#FINIT	O	半楕円き裂の長さに関するデータ入力
12	#CNTPRM	O	解析経過の画面表示間隔の入力
13	#TBLPRM	O	表出力のデータ形式入力
14	#CONT	O	連続解析用データ入力
15	#END	M	入力データの修了

表 3.2.11 解析事例 4 の入力カードセット及びその内容説明

No.	カードセット名	カードセットタイプ	カードセットの内容説明
1	#TITLE	O	解析タイトルの入力
2	#FLAG	M	解析の流れを制御するためのフラグ入力
3	#VESSEL	M	圧力容器のデータ入力
4	#TRANS	M	過渡事象のデータ入力
5	#TEMP	M	温度分布の時刻歴入力
6	#STRS3D	C	3次多項式応力分布の時刻歴入力
7	#PRESFM	O	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)
8	#CRACKA	O	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力
9	#CRACKB	O	初期き裂アスペクト比の分布 (対数正規分布) の入力
10	#CASPCT	O	半楕円き裂の初期き裂平面の均等分割データの入力
11	#CDEPTH	O	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力
12	#MATRAL	M	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力
13	#CNTPRM	O	解析経過の画面表示間隔の入力
14	#TBLPRM	O	表出力のデータ形式入力
15	#CONT	O	連続解析用データ入力
16	#END	M	入力データの修了

表 3.2.12 解析事例 5 の入力カードセット及びその内容説明

No.	カードセット名	カードセットタイプ	カードセットの内容説明
1	#TITLE	O	解析タイトルの入力
2	#FLAG	M	解析の流れを制御するためのフラグ入力
3	#VESSEL	M	圧力容器のデータ入力
4	#TRANS	M	過渡事象のデータ入力
5	#TEMP	M	温度分布の時刻歴入力
6	#STRS3D	C	3次多項式応力分布の時刻歴入力
7	#PRESFM	O	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)
8	#CRACKA	O	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力
9	#CDEPTH	O	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力
10	#MATRAL	M	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力
11	#ANNEAL	O	焼鈍および再脆化の情報の入力
12	#CNTPRM	O	解析経過の画面表示間隔の入力
13	#TBLPRM	O	表出力のデータ形式入力
14	#CONT	O	連続解析用データ入力
15	#END	M	入力データの修了

表 3.2.13 解析事例 6 の入力カードセット及びその内容説明

No.	カードセット名	カードセットタイプ	カードセットの内容説明
1	#TITLE	O	解析タイトルの入力
2	#FLAG	M	解析の流れを制御するためのフラグ入力
3	#VESSEL	M	圧力容器のデータ入力
4	#TRANS	M	過渡事象のデータ入力
5	#TEMP	M	温度分布の時刻歴入力
6	#STRS3D	C	3次多項式応力分布の時刻歴入力
7	#PRESFM	O	内圧の時刻歴入力 (4次多項式)
8	#CRACKA	O	初期き裂深さの分布 (指数分布) の入力
9	#CDEPTH	O	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析のデータ入力
10	#MATRAL	M	評価対象材料の物性, 化学成分に関するデータ入力
11	#CNTPRM	O	解析経過の画面表示間隔の入力
12	#TBLPRM	O	表出力のデータ形式入力
13	#R6	O	R6法のパラメータ入力
14	#CORREL	O	$K_{Ia}$ と $K_{Ic}$ の相関係数の入力
13	#CONT	O	連続解析用データ入力
14	#END	M	入力データの修了

### 3.3 入力データ例

ここで 4.2 節「入力フラグと必要カードセットの対応」で想定したケースの入力カード事例を示す。4.2 節と同じ、解析条件は NRC/EPRI のベンチマーク解析基本条件を使用する。

#### (1) 解析事例 1 の入力データ

解析事例 1 (軸方向無限長き裂に関する解析事例) の入力データをリスト表 3.3.1 に示す



表 3.3.1 解析事例 1 (軸方向無限長き裂に関する解析事例) の入力データ

```

#TITLE
a5-str3d
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#FLAG
c 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
  0 1 1 1 0 0 0 1 0 0
  0 0 0 1 0 0 0 23 21 0
  0 1 0 0 1 0 0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#VESSEL
  0.2286 2.286 3.0 9.4
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#TRANS
  100.0 10.00 0 6.35 1.0 1.0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5---6
#TEMP
  10 33
  0.000E+00 1.389E-02 2.778E-02 5.556E-02 8.333E-02
  1.111E-01 1.389E-01 1.667E-01 1.944E-01 2.222E-01
  2.500E-01 2.778E-01 3.056E-01 3.333E-01 3.631E-01
  3.930E-01 4.228E-01 4.527E-01 4.824E-01 5.123E-01
  5.421E-01 5.719E-01 6.018E-01 6.316E-01 6.614E-01
  6.912E-01 7.210E-01 7.509E-01 7.807E-01 8.106E-01
  8.403E-01 8.702E-01 9.000E-01
  1.000E+01
  1.151E+02 1.578E+02 1.631E+02 1.733E+02 1.827E+02
  1.916E+02 1.998E+02 2.074E+02 2.146E+02 2.212E+02
  2.273E+02 2.330E+02 2.382E+02 2.430E+02 2.478E+02
  2.521E+02 2.561E+02 2.597E+02 2.630E+02 2.660E+02
  2.687E+02 2.711E+02 2.733E+02 2.752E+02 2.769E+02
  2.784E+02 2.797E+02 2.809E+02 2.818E+02 2.826E+02
  2.832E+02 2.837E+02 2.841E+02
      省 略
  1.000E+02
  6.556E+01 7.012E+01 7.068E+01 7.178E+01 7.287E+01
  7.396E+01 7.503E+01 7.608E+01 7.712E+01 7.814E+01
  7.914E+01 8.012E+01 8.108E+01 8.201E+01 8.298E+01
  8.392E+01 8.482E+01 8.569E+01 8.653E+01 8.732E+01
  8.808E+01 8.879E+01 8.947E+01 9.009E+01 9.068E+01
  9.122E+01 9.171E+01 9.216E+01 9.256E+01 9.291E+01
  9.321E+01 9.345E+01 9.365E+01
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#STRS3D
  10
  1.000E+01 -6.07520E+02 1.65356E+03 -1.60641E+03 4.72312E+02
  2.000E+01 2.96580E+00 6.49681E+02 -1.28399E+03 4.93750E+02
      省 略
  9.000E+01 5.02962E+01 3.78174E+01 -2.22913E+02 1.55282E+02
  1.000E+02 4.18342E+01 2.58900E+01 -1.74266E+02 1.37059E+02
  10
  1.000E+01 -6.01764E+02 1.64516E+03 -1.59588E+03 4.33876E+02
  2.000E+01 -4.28753E+00 6.58631E+02 -1.27932E+03 4.55813E+02
      省 略
  9.000E+01 5.08995E+01 3.48926E+01 -2.13701E+02 1.16992E+02
  1.000E+02 3.84357E+01 3.05710E+01 -1.68805E+02 9.90794E+01
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#PRESFM
    
```

```

      6.895    6.895    6.895    6.895    6.895
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CRACKA
      0.16    1.0E-08
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CDEPTH
      30    1000000030000    0.0d0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#MATRAL
      0.0      0.0    -6.667    9.444    0.0
      5.0      0.3    0.025    0.08    4.0
      0.75     0.0    0.0    100.0    0.0
      0.0      0.0    100.0    0.0    0.0
      0.0    100.0    0.1    5.0    0.1
      5.0      0.3    219.8    551.6
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CNTPRM
      10    10000    10
C-----1-----2-----3-----4-----5
#TBLPRM
      0      100    30
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CONT
$SETSTART a5-str3d-2.0
      1    1
a5-str3d-2.0
      3    3
      2.0
$SETEND

```

省 略

```

#END
C-----1-----2-----3-----4-----5

```

(2) 解析事例2の入力データ

解析事例2 (周方向無限長き裂に関する解析事例) の入力データを表 3.3.2 に示す

表 3.3.2 解析事例2 (周方向無限長き裂に関する解析事例) の入力データ

```

#TITLE
b5-str3d
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#FLAG
c 1---2---3---4---5---6---7---8---9---10
  0 1 1 1 0 0 0 1 0 0
  0 0 0 0 0 0 0 13 12 0
  0 1 0 0 1 0 0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#VESSEL
  0.2286      2.286      3.0      9.4
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#TRANS
  100.0      10.00      0      6.35      1.0      1.0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5---6
#TEMP
  10 33
  0.000E+00 1.389E-02 2.778E-02 5.556E-02 8.333E-02
  1.111E-01 1.389E-01 1.667E-01 1.944E-01 2.222E-01
  2.500E-01 2.778E-01 3.056E-01 3.333E-01 3.631E-01
  3.930E-01 4.228E-01 4.527E-01 4.824E-01 5.123E-01
  5.421E-01 5.719E-01 6.018E-01 6.316E-01 6.614E-01
  6.912E-01 7.210E-01 7.509E-01 7.807E-01 8.106E-01
  8.403E-01 8.702E-01 9.000E-01
  1.000E+01
  1.151E+02 1.578E+02 1.631E+02 1.733E+02 1.827E+02
  1.916E+02 1.998E+02 2.074E+02 2.146E+02 2.212E+02
  2.273E+02 2.330E+02 2.382E+02 2.430E+02 2.478E+02
  2.521E+02 2.561E+02 2.597E+02 2.630E+02 2.660E+02
  2.687E+02 2.711E+02 2.733E+02 2.752E+02 2.769E+02
  2.784E+02 2.797E+02 2.809E+02 2.818E+02 2.826E+02
  2.832E+02 2.837E+02 2.841E+02
      省 略
  1.000E+02
  6.556E+01 7.012E+01 7.068E+01 7.178E+01 7.287E+01
  7.396E+01 7.503E+01 7.608E+01 7.712E+01 7.814E+01
  7.914E+01 8.012E+01 8.108E+01 8.201E+01 8.298E+01
  8.392E+01 8.482E+01 8.569E+01 8.653E+01 8.732E+01
  8.808E+01 8.879E+01 8.947E+01 9.009E+01 9.068E+01
  9.122E+01 9.171E+01 9.216E+01 9.256E+01 9.291E+01
  9.321E+01 9.345E+01 9.365E+01
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#STRS3D
  10
  1.000E+01 -6.07520E+02 1.65356E+03 -1.60641E+03 4.72312E+02
  2.000E+01 2.96580E+00 6.49681E+02 -1.28399E+03 4.93750E+02
      省 略
  9.000E+01 5.02962E+01 3.78174E+01 -2.22913E+02 1.55282E+02
  1.000E+02 4.18342E+01 2.58900E+01 -1.74266E+02 1.37059E+02
  10
  1.000E+01 -6.01764E+02 1.64516E+03 -1.59588E+03 4.33876E+02
  2.000E+01 -4.28753E+00 6.58631E+02 -1.27932E+03 4.55813E+02
      省 略
    
```

```

9.000E+01  5.08995E+01  3.48926E+01  -2.13701E+02  1.16992E+02
1.000E+02  3.84357E+01  3.05710E+01  -1.68805E+02  9.90794E+01
C-----1-----2-----3-----4-----5
#PRESFM
  6.895  6.895  6.895  6.895  6.895
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CRACKA
  0.16  1.0E-08
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CDEPTH
  30 1000000040000  0.0d0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#MATRAL
  0.0  0.0 -6.667  9.444  0.0
  5.0  0.3  0.025  0.08  4.0
  0.75  0.0  0.0  100.0  0.0
  0.0  0.0  100.0  0.0  0.0
  0.0  100.0  0.1  5.0  0.1
  5.0  0.3  219.8  551.6
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CNTPRM
  10  10000  10
C-----1-----2-----3-----4-----5
#TBLPRM
  0  100  30
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CONT
$SETSTART b5-str3d-2.0
  1  1
b5-str3d-2.0
  3  3
  2.0
$SETEND

      省  略

#END
C-----1-----2-----3-----4-----5

```

(3) 解析事例3の入力データ

解析事例3 (アスペクト比固定の半楕円軸方向き裂に関する解析事例) の入力データを表 3.3.3 に示す

表 3.3.3 解析事例3 (アスペクト比固定半楕円軸方向き裂) の入力データ その1

```

#TITLE
a5-se-str3d-3.0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#FLAG
c 1---2---3---4---5---6---7---8---9---10
  0 1 1 1 0 0 0 1 0 0
  0 0 3 1 0 0 0 23 22 0
  0 3 0 0 1 0 0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#VESSEL
  0.2286 2.286 3.0 9.4
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#TRANS
  100.0 10.00 0 6.35 1.0 1.0
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5---6
#TEMP
  10 33
  0.000E+00 1.389E-02 2.778E-02 5.556E-02 8.333E-02
  1.111E-01 1.389E-01 1.667E-01 1.944E-01 2.222E-01
  2.500E-01 2.778E-01 3.056E-01 3.333E-01 3.631E-01
  3.930E-01 4.228E-01 4.527E-01 4.824E-01 5.123E-01
  5.421E-01 5.719E-01 6.018E-01 6.316E-01 6.614E-01
  6.912E-01 7.210E-01 7.509E-01 7.807E-01 8.106E-01
  8.403E-01 8.702E-01 9.000E-01
  1.000E+01
  1.151E+02 1.578E+02 1.631E+02 1.733E+02 1.827E+02
  1.916E+02 1.998E+02 2.074E+02 2.146E+02 2.212E+02
  2.273E+02 2.330E+02 2.382E+02 2.430E+02 2.478E+02
  2.521E+02 2.561E+02 2.597E+02 2.630E+02 2.660E+02
  2.687E+02 2.711E+02 2.733E+02 2.752E+02 2.769E+02
  2.784E+02 2.797E+02 2.809E+02 2.818E+02 2.826E+02
  2.832E+02 2.837E+02 2.841E+02
          省 略
  1.000E+02
  6.556E+01 7.012E+01 7.068E+01 7.178E+01 7.287E+01
  7.396E+01 7.503E+01 7.608E+01 7.712E+01 7.814E+01
  7.914E+01 8.012E+01 8.108E+01 8.201E+01 8.298E+01
  8.392E+01 8.482E+01 8.569E+01 8.653E+01 8.732E+01
  8.808E+01 8.879E+01 8.947E+01 9.009E+01 9.068E+01
  9.122E+01 9.171E+01 9.216E+01 9.256E+01 9.291E+01
  9.321E+01 9.345E+01 9.365E+01
C +---1---+---2---+---3---+---4---+---5
#STRS3D
  10
  1.000E+01 -6.07520E+02 1.65356E+03 -1.60641E+03 4.72312E+02
  2.000E+01 2.96580E+00 6.49681E+02 -1.28399E+03 4.93750E+02
          省 略
  9.000E+01 5.02962E+01 3.78174E+01 -2.22913E+02 1.55282E+02
  1.000E+02 4.18342E+01 2.58900E+01 -1.74266E+02 1.37059E+02
  10
  1.000E+01 -6.01764E+02 1.64516E+03 -1.59588E+03 4.33876E+02
  2.000E+01 -4.28753E+00 6.58631E+02 -1.27932E+03 4.55813E+02
    
```

省 略

```

9.000E+01  5.08995E+01  3.48926E+01  -2.13701E+02  1.16992E+02
1.000E+02  3.84357E+01  3.05710E+01  -1.68805E+02  9.90794E+01
C-----1-----2-----3-----4-----5
#PRESFM
      6.895      6.895      6.895      6.895      6.895
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CRACKA
      0.16      1.0E-08
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CDEPTH
      30 1000000030000      0.0d0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#MATRAL
      0.0      0.0     -6.667      9.444      0.0
      5.0      0.3      0.025      0.08      4.0
      0.75     0.0      0.0      100.0     0.0
      0.0      0.0     100.0      0.0      0.0
      0.0     100.0      0.1      5.0      0.1
      5.0      0.3     219.8     551.6
C-----1-----2-----3-----4-----5
#FINIT
      999.0      1.0      0.1      3.0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CNTPRM
      10     10000      10
C-----1-----2-----3-----4-----5
#TBLPRM
      0      100      30
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CONT
$SETSTART a5-se-str3d-2.0
      1      1
a5-se-str3d-2.0
      3      3
      2.0
$SETEND

```

省 略

```

#END
C-----1-----2-----3-----4-----5

```

(4) 解析事例4の入力データ

解析事例4 (アスペクト比の分布も考慮する半楕円軸方向き裂に関する解析事例) の入力データをリスト3.3.4に示す

表 3.3.4 解析事例4 (アスペクト比の分布も考慮する半楕円軸方向き裂) の入力データ

```

#TITLE
a5-se-3dsh-3.0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#FLAG
c-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----10
0 1 1 1 0 0 0 0 1 0 0
0 0 1 1 0 0 0 0 23 22 0
0 3 0 0 1 0 0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#VESSEL
0.2286 2.286 3.0 9.4
C-----1-----2-----3-----4-----5
#TRANS
100.0 10.00 0 6.35 1.0 1.0
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6
#TEMP
10 33
0.000E+00 1.389E-02 2.778E-02 5.556E-02 8.333E-02
1.111E-01 1.389E-01 1.667E-01 1.944E-01 2.222E-01
2.500E-01 2.778E-01 3.056E-01 3.333E-01 3.631E-01
3.930E-01 4.228E-01 4.527E-01 4.824E-01 5.123E-01
5.421E-01 5.719E-01 6.018E-01 6.316E-01 6.614E-01
6.912E-01 7.210E-01 7.509E-01 7.807E-01 8.106E-01
8.403E-01 8.702E-01 9.000E-01
1.000E+01
1.151E+02 1.578E+02 1.631E+02 1.733E+02 1.827E+02
1.916E+02 1.998E+02 2.074E+02 2.146E+02 2.212E+02
2.273E+02 2.330E+02 2.382E+02 2.430E+02 2.478E+02
2.521E+02 2.561E+02 2.597E+02 2.630E+02 2.660E+02
2.687E+02 2.711E+02 2.733E+02 2.752E+02 2.769E+02
2.784E+02 2.797E+02 2.809E+02 2.818E+02 2.826E+02
2.832E+02 2.837E+02 2.841E+02
省略
1.000E+02
6.556E+01 7.012E+01 7.068E+01 7.178E+01 7.287E+01
7.396E+01 7.503E+01 7.608E+01 7.712E+01 7.814E+01
7.914E+01 8.012E+01 8.108E+01 8.201E+01 8.298E+01
8.392E+01 8.482E+01 8.569E+01 8.653E+01 8.732E+01
8.808E+01 8.879E+01 8.947E+01 9.009E+01 9.068E+01
9.122E+01 9.171E+01 9.216E+01 9.256E+01 9.291E+01
9.321E+01 9.345E+01 9.365E+01
C-----1-----2-----3-----4-----5
#STRS3D
10
1.000E+01 -6.07520E+02 1.65356E+03 -1.60641E+03 4.72312E+02
2.000E+01 2.96580E+00 6.49681E+02 -1.28399E+03 4.93750E+02
省略
9.000E+01 5.02962E+01 3.78174E+01 -2.22913E+02 1.55282E+02
1.000E+02 4.18342E+01 2.58900E+01 -1.74266E+02 1.37059E+02
10
1.000E+01 -6.01764E+02 1.64516E+03 -1.59588E+03 4.33876E+02
2.000E+01 -4.28753E+00 6.58631E+02 -1.27932E+03 4.55813E+02

```

省 略

```

9.000E+01  5.08995E+01  3.48926E+01  -2.13701E+02  1.16992E+02
1.000E+02  3.84357E+01  3.05710E+01  -1.68805E+02  9.90794E+01
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#PRESFM
   6.895   6.895   6.895   6.895   6.895
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#CRACKA
   0.16   1.0E-08
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#CRACKB
   1.336   0.538
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#CASPCT
c 30 20   0.0   0.5   0.0   1.0 1000
   30 20   0.0   0.5   0.0   1.0 5000
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5 +---+
#MATRAL
   0.0   0.0  -6.667   9.444   0.0
   5.0   0.3   0.025   0.08   4.0
   0.75   0.0   0.0   100.0   0.0
   0.0   0.0   100.0   0.0   0.0
   0.0   100.0   0.1   5.0   0.1
   5.0   0.3   219.8   551.6
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#FINIT
   999.0   1.0   0.1
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#CNTPRM
   5   10000   10
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#TBLPRM
   0   100   30
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#CONT
$SETSTART a5-se-3dsh-2.0
  1 1
a5-se-3dsh-2.0
  3 3
  2.0
$SETEND

```

省 略

```

#END
C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

```



(5) 解析事例5の入力データ

解析事例5 (焼鈍を考慮した解析事例) の入力データをリスト3.3.5に示す

表 3.3.5 解析事例5 (焼鈍を考慮した解析事例) の入力データ

```

#TITLE
a5-str3d-3.0
C  +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#FLAG
c  +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5 +---+ 6 +---+ 7 +---+ 8 +---+ 9 +---+ 10
    0  1  1  1  0  0  0  1  0  0
    0  0  0  1  0  0  0  23  21  0
    0  1  0  0  1  0  0
    0  0  0  1
C  +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#VESSEL
    0.2286    2.286    3.0    9.4
C  +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#TRANS
    100.0    10.00    0    6.35    1.0    1.0
C  +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5 +---+ 6
#TEMP
    10  33
    0.000E+00 1.389E-02 2.778E-02 5.556E-02 8.333E-02
    1.111E-01 1.389E-01 1.667E-01 1.944E-01 2.222E-01
    2.500E-01 2.778E-01 3.056E-01 3.333E-01 3.631E-01
    3.930E-01 4.228E-01 4.527E-01 4.824E-01 5.123E-01
    5.421E-01 5.719E-01 6.018E-01 6.316E-01 6.614E-01
    6.912E-01 7.210E-01 7.509E-01 7.807E-01 8.106E-01
    8.403E-01 8.702E-01 9.000E-01
    1.000E+01
    1.151E+02 1.578E+02 1.631E+02 1.733E+02 1.827E+02
    1.916E+02 1.998E+02 2.074E+02 2.146E+02 2.212E+02
    2.273E+02 2.330E+02 2.382E+02 2.430E+02 2.478E+02
    2.521E+02 2.561E+02 2.597E+02 2.630E+02 2.660E+02
    2.687E+02 2.711E+02 2.733E+02 2.752E+02 2.769E+02
    2.784E+02 2.797E+02 2.809E+02 2.818E+02 2.826E+02
    2.832E+02 2.837E+02 2.841E+02
        省  略
    1.000E+02
    6.556E+01 7.012E+01 7.068E+01 7.178E+01 7.287E+01
    7.396E+01 7.503E+01 7.608E+01 7.712E+01 7.814E+01
    7.914E+01 8.012E+01 8.108E+01 8.201E+01 8.298E+01
    8.392E+01 8.482E+01 8.569E+01 8.653E+01 8.732E+01
    8.808E+01 8.879E+01 8.947E+01 9.009E+01 9.068E+01
    9.122E+01 9.171E+01 9.216E+01 9.256E+01 9.291E+01
    9.321E+01 9.345E+01 9.365E+01
C  +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5
#STRS3D
    10
    1.000E+01 -5.86960E+02 1.60001E+03 -1.55666E+03 4.60044E+02
    2.000E+01 2.37992E+00 6.31558E+02 -1.24625E+03 4.81115E+02
        省  略
    9.000E+01 4.85008E+01 3.71434E+01 -2.16549E+02 1.52779E+02
    1.000E+02 3.94451E+01 2.67550E+01 -1.69962E+02 1.35163E+02
    10
    1.000E+01 -5.85131E+02 1.59779E+03 -1.54864E+03 4.21885E+02
    2.000E+01 4.03483E-01 6.31619E+02 -1.23783E+03 4.42869E+02
        省  略
    
```

```

9.000E+01  5.13289E+01  3.31004E+01  -2.08314E+02  1.14857E+02
1.000E+02  4.24351E+01  2.17293E+01  -1.60688E+02  9.69495E+01
C-----1-----2-----3-----4-----5
#PRESFM
6.895      6.895      6.895      6.895      6.895
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CRACKA
0.16      1.0E-08
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CDEPTH
30 1000000030000      0.0d0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#MATRAL
0.0      0.0      -6.667      9.444      0.0
5.0      0.3      0.025      0.08      4.0
0.75     0.0      0.0      100.0     0.0
0.0      0.0      100.0     0.0      0.0
0.0     100.0     0.1      5.0      0.1
5.0      0.3      219.8     551.6
C-----1-----2-----3-----4-----5
#ANNEAL
0 0
37.49     20.0
365.4     168.0     7.0d12     288.0     90.0
0.0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CNTPRM
10 10000      10
C-----1-----2-----3-----4-----5
#TBLPRM
0 100      30
C-----1-----2-----3-----4-----5
#CONT
$SETSTART a5-str3d-ann-37.49-0.5
1 1
a5-str3d-ann-37.49-0.5
36 10
0.5
$SETEND

```

省 略

```

C-----1-----2-----3-----4-----5
#END
C-----1-----2-----3-----4-----5

```

(6) 解析事例6の入力データ

解析事例6 (R6法を考慮した解析事例) の入力データをリスト3.3.6に示す

表 3.3.6 解析事例6 (R6法を考慮した解析事例) の入力データ

```

#TITLE
a5-str3d-olcl
C-----1-----2-----3-----4-----5
#FLAG
c-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----10
0 1 1 1 0 0 0 1 0 0
0 0 0 1 0 0 0 23 21 0
1 1 0 0 1 1 0
0 1 0 0 0
C-----1-----2-----3-----4-----5
#VESSEL
0.2286 2.286 3.0 9.4
C-----1-----2-----3-----4-----5
#TRANS
100.0 1.00 0 0.10 1.0 1.0
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6
#TEMP
10 33
0.000E+00 1.389E-02 2.778E-02 5.556E-02 8.333E-02
1.111E-01 1.389E-01 1.667E-01 1.944E-01 2.222E-01
2.500E-01 2.778E-01 3.056E-01 3.333E-01 3.631E-01
3.930E-01 4.228E-01 4.527E-01 4.824E-01 5.123E-01
5.421E-01 5.719E-01 6.018E-01 6.316E-01 6.614E-01
6.912E-01 7.210E-01 7.509E-01 7.807E-01 8.106E-01
8.403E-01 8.702E-01 9.000E-01
1.000E+01
1.151E+02 1.578E+02 1.631E+02 1.733E+02 1.827E+02
1.916E+02 1.998E+02 2.074E+02 2.146E+02 2.212E+02
2.273E+02 2.330E+02 2.382E+02 2.430E+02 2.478E+02
2.521E+02 2.561E+02 2.597E+02 2.630E+02 2.660E+02
2.687E+02 2.711E+02 2.733E+02 2.752E+02 2.769E+02
2.784E+02 2.797E+02 2.809E+02 2.818E+02 2.826E+02
2.832E+02 2.837E+02 2.841E+02

省 略

1.000E+02
6.556E+01 7.012E+01 7.068E+01 7.178E+01 7.287E+01
7.396E+01 7.503E+01 7.608E+01 7.712E+01 7.814E+01
7.914E+01 8.012E+01 8.108E+01 8.201E+01 8.298E+01
8.392E+01 8.482E+01 8.569E+01 8.653E+01 8.732E+01
8.808E+01 8.879E+01 8.947E+01 9.009E+01 9.068E+01
9.122E+01 9.171E+01 9.216E+01 9.256E+01 9.291E+01
9.321E+01 9.345E+01 9.365E+01
C-----1-----2-----3-----4-----5
#STRS3D
10
1.000E+01 -5.86960E+02 1.60001E+03 -1.55666E+03 4.60044E+02
2.000E+01 2.37992E+00 6.31558E+02 -1.24625E+03 4.81115E+02

省 略

9.000E+01 4.85008E+01 3.71434E+01 -2.16549E+02 1.52779E+02
1.000E+02 3.94451E+01 2.67550E+01 -1.69962E+02 1.35163E+02
10
1.000E+01 -5.85131E+02 1.59779E+03 -1.54864E+03 4.21885E+02
2.000E+01 4.03483E-01 6.31619E+02 -1.23783E+03 4.42869E+02
    
```

省 略

9.000E+01 5.13289E+01 3.31004E+01 -2.08314E+02 1.14857E+02  
 1.000E+02 4.24351E+01 2.17293E+01 -1.60688E+02 9.69495E+01

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#PRESFM

6.895 6.895 6.895 6.895 6.895

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#CRACKA

0.16 1.0E-08

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#CDEPTH

30 1000000030000 0.0d0

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#MATRAL

2.0e05	0.3	-6.667	9.444	0.0
5.0	0.3	0.025	0.08	4.0
0.75	0.0	0.0	100.0	0.0
0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
0.0	100.0	0.1	5.0	0.1
5.0	0.3	219.8	551.6	

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#CNTPRM

c	10	10000	10
	10	1000	10

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#TBLPRM

0 100 30

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#R6

1	1	1.15	1	0	0
	0.1	5.0	0		
	191.0	30.0			

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#CORREL

1.0

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#CONT

\$SETSTART a5-str3d-olcl-2.0

1 1

a5-str3d-olcl-2.0

3 3

2.0

\$SETEND

省 略

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

#END

C +---+ 1 +---+ 2 +---+ 3 +---+ 4 +---+ 5

### 3.4 PASCAL の結果と VISA-II の結果の比較

本解析コードは、R 6 法による破損評価、固定寸法初期き裂評価機能、分布を持った半楕円き裂評価機能、半楕円き裂進展解析機能、焼鈍効果解析機能、応力拡大係数解析機能、国内圧力容器に関する評価式など様々な新規機能を考慮できるようにしている同時に、VISA-II、OCA-P などこれまでの既存解析コードの基本解析機能も含まれている。

本解析コードの信頼性を検証するために、基本解析機能に関して、VISA-II、OCA-P などの既存解析コードとの比較を行われてきた。ここでは、そのうちの NRC/EPRI の基本問題 A5、B5 に関する解析事例をまとめる。

NRC/EPRI の基本問題 A5、B5 の解析条件に関しては 3.2 節、PASCAL の入力データに関しては 3.3 節の通りである。応力の時刻歴を 3 次多項式で評価し、VISA-II による解を用いている。応力拡大係数に関しては 3 次多項式の応力分布に対応した VISA-II の解を適用している。また、VISA-II と比較を行うためには、偏差再計算手法に関しては VISA-II の評価方式を適用している。PASCAL と VISA-II の解析結果を表 3.4.1～表 3.4.2、及び図 3.4.1～図 3.4.4 に示す。

表 3.4.1～表 3.4.2、及び図 3.4.1～図 3.4.4 から、解析条件が同じである場合は、PASCAL と VISA-II の解析結果は良好に一致していることが確認できる。

表 3.4.1 軸方向無限長き裂に関する解析結果 (NRC/EPRI ベンチマーク基本問題 A5)

フルエンス ( $\times 10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> )	条件付き破壊確率		条件付きき裂進展確率	
	VISA-II	PASCAL	VISA-II	PASCAL
0.5	6.634E-03	6.868E-03	3.014E-02	3.200E-02
1.0	1.206E-01	1.243E-01	1.684E-01	1.746E-01
2.0	3.313E-01	3.291E-01	3.440E-01	3.418E-01
3.0	4.257E-01	4.208E-01	4.287E-01	4.244E-01

表 3.4.2 周方向無限長き裂に関する解析結果 (NRC/EPRI ベンチマーク基本問題 B5)

フルエンス ( $\times 10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> )	条件付き破壊確率		条件付きき裂進展確率	
	VISA-II	PASCAL	VISA-II	PASCAL
1.0	1.400E-06	1.600E-06	8.694E-02	9.177E-02
1.5	5.462E-04	4.522E-04	1.747E-01	1.820E-01
2.0	7.387E-03	6.715E-03	2.412E-01	2.484E-01
3.0	7.174E-02	6.868E-02	3.284E-01	3.337E-01

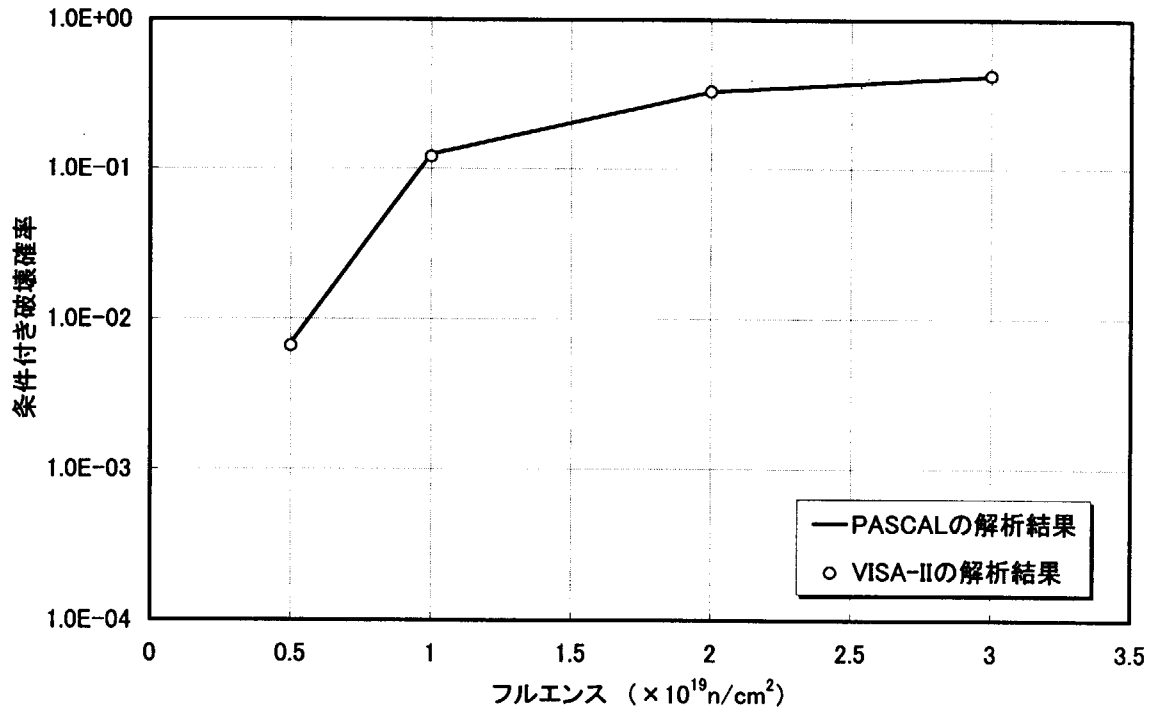


図 3.4.1 軸方向無限長き裂の破壊確率に関する解析結果

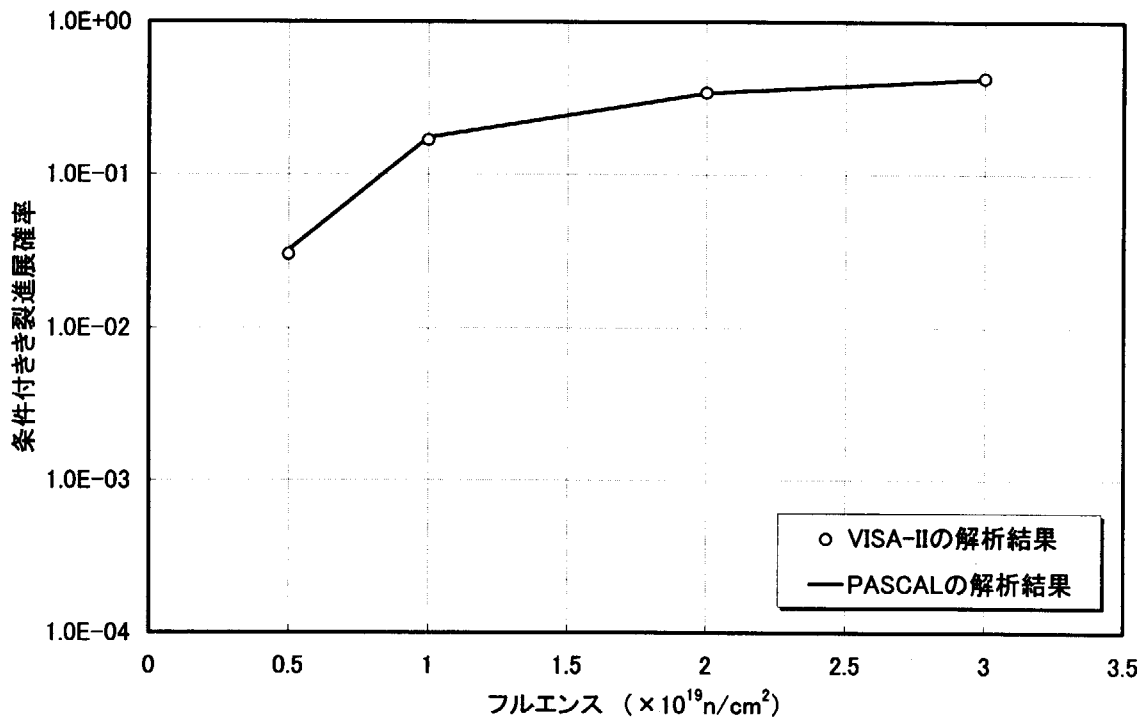


図 3.4.2 軸方向無限長き裂のき裂進展確率に関する解析結果

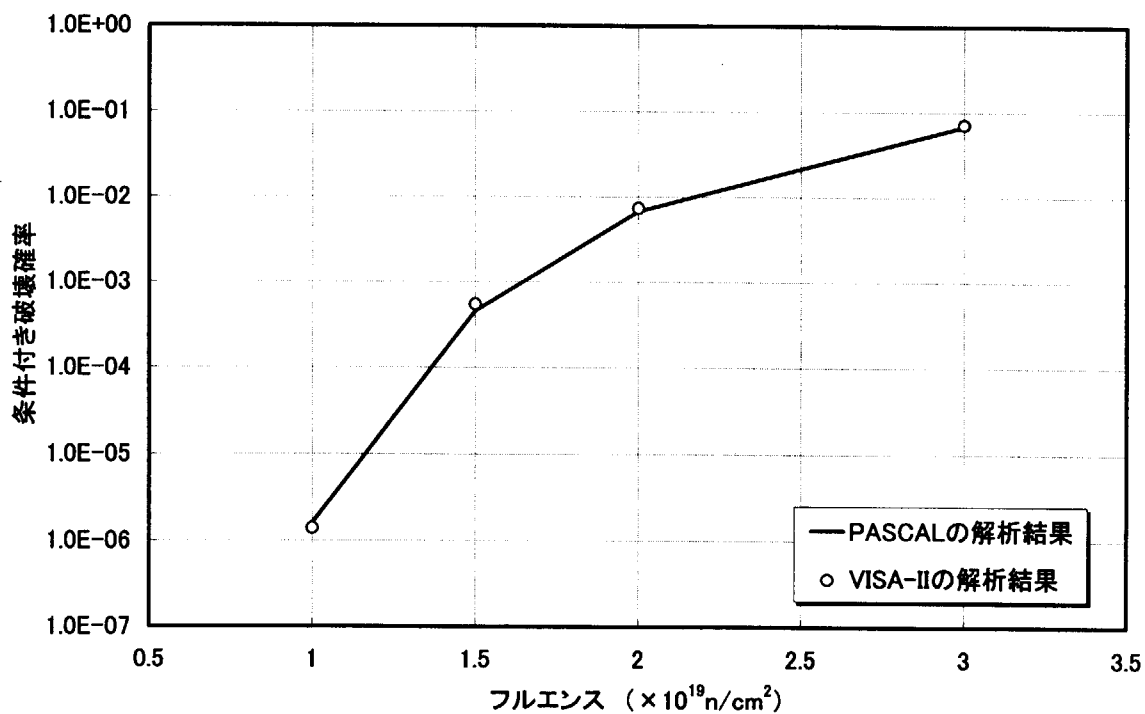


図 3.4.3 周方向無限長き裂の破壊確率に関する解析結果

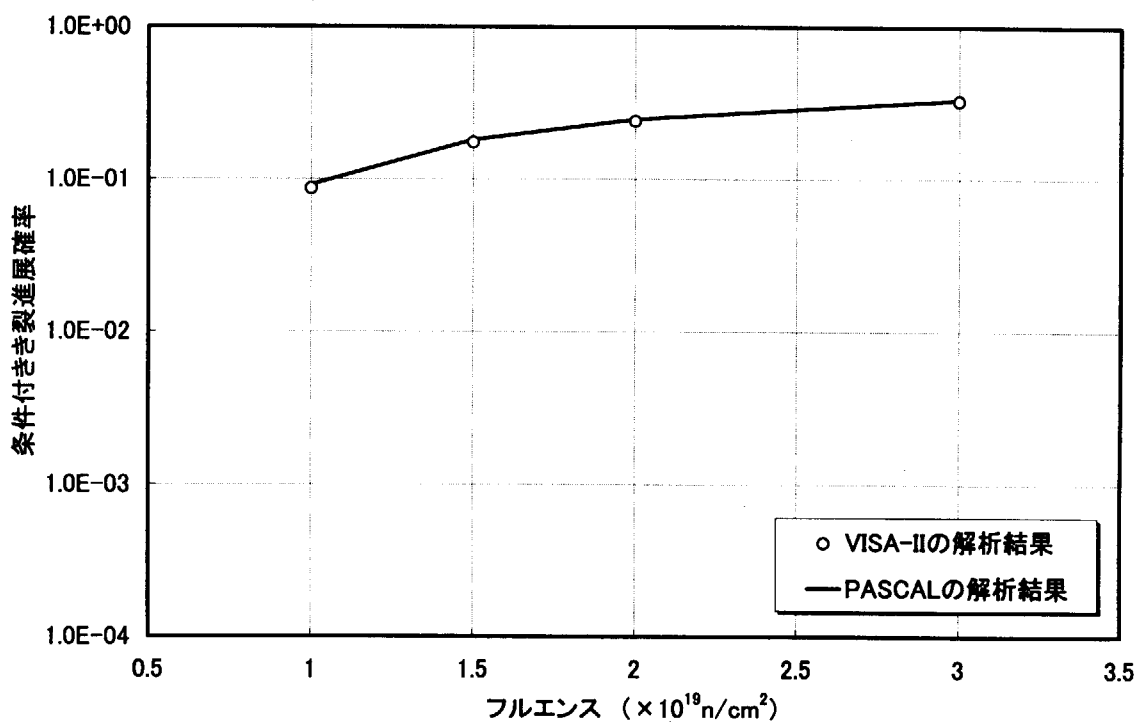


図 3.4.4 周方向無限長き裂のき裂進展確率に関する解析結果

## 4. 出力説明

本解析コードによる解析を実行すると、以下の8つのファイルが作成される。

- ・ 1番、2番ファイル（テンポラリーファイル）
- ・ 11番ファイル（入力カードのエコー出力ファイル）
- ・ 26番ファイル（評価結果の Excel 形式出力ファイル）
- ・ 27番ファイル（き裂進展状況詳細出力ファイル）
- ・ 66番ファイル（R6法用き裂進展状況詳細出力ファイル）
- ・ 20番ファイル（outファイル、メイン出力ファイル）
- ・ 30番ファイル（rs1ファイル、解析結果出力専用ファイル）

26番の図形データ出力ファイル、27番のき裂進展状況出力ファイル、66番のR6法破壊評価曲線出力ファイルについては、フラグを立てた場合のみ、ファイルの中身が出力される。

以下に、各出力ファイルに記述されている内容について説明する。

### 4.1 入力カードのエコー出力ファイル (File number = 11)

11番ファイルは入力カードイメージのエコー出力であり、出力されている内容は、入力カードイメージからコメント行を削除したものに等しい。プログラムは、入力データを読み込む前にこのファイルを作成し、入力データはこのファイルから読み込む。

### 4.2 メイン出力ファイル (File number = 20)

20番ファイルは出力のメインファイルであり、出力内容は解析条件、エラーメッセージ、き裂採点手法、解析結果である。

解析条件は入力された情報を整理し、実際に解析で使用する条件のみを各項目ごとに出力する。

エラーメッセージは、エラー発生パラメータ、エラー発生パラメータの意味説明、エラー発生理由などであり、発生したエラーの重要度から警告を“ERROR”と“WARNING”に区別する。

“ERROR”が発生した場合は解析を強制的に停止し、“WARNING”が発生した場合はメッセージをファイルに出力するが、解析は続行する。

き裂採点情報には、無限長き裂を解析している場合はき裂分布区間分割とき裂採点確率に関する情報を、また半楕円き裂を解析している場合は各階層の領域、採点数、き裂存在確率、階層の重みを出力する。

解析結果はき裂破壊確率、き裂進展確率、き裂停止確率等と、無限長き裂を解析している場合はき裂深さ分割区間ごとの破壊確率、進展確率、進展停止確率等を、半楕円き裂を解析している場合は、各階層ごとの破壊数、進展数、停止数と破壊割合、進展割合、進展停止割合などを出力



する。

#### 4.3 図形データ出力ファイル (File number = 26)

26 番ファイルには、図形処理を行うことを目的としたデータが出力される。出力形式は Excel 形式と Gnu Plot 形式を選択することが可能である。Excel 形式は、カンマ区切りテキスト形式で出力される。出力項目は、無限長き裂に対しては

- ・ 温度分布
- ・ 応力分布
- ・ 破壊靱性値  $K_{Ic}$  分布
- ・ 破壊靱性値  $K_{Ia}$  分布
- ・ 無限長き裂の応力拡大係数  $K_I$  分布
- ・ 初期き裂深さ分布区間分割領域
- ・ 各区間のき裂存在確率
- ・ 各区間のき裂存在確率 (き裂存在のしきい値を考慮した存在確率)
- ・ 各区間の採点数
- ・ 各区間のき裂破壊数、き裂進展数、き裂進展停止数
- ・ 各区間のき裂破壊確率、き裂進展確率、き裂進展停止確率

であり、半楕円き裂に対しては

- ・ 温度分布
- ・ 応力分布
- ・ 破壊靱性値  $K_{Ic}$  分布
- ・ 破壊靱性値  $K_{Ia}$  分布
- ・ 無限長き裂の応力拡大係数  $K_I$  分布
- ・ 各時間ごとの、半楕円き裂の応力拡大係数  $K_I$  分布 (き裂先端)
- ・ 各時間ごとの、半楕円き裂の応力拡大係数  $K_I$  分布 (き裂表面)
- ・ 各階層の重み
- ・ 各階層ごとのき裂破壊数、き裂進展数 (深さ方向)、き裂進展数 (長さ方向)、き裂進展停止数
- ・ 各階層ごとのき裂破壊割合、き裂進展割合 (深さ方向)、き裂進展割合 (長さ方向)、き裂進展停止割合
- ・ 各階層ごとのき裂破壊確率、き裂進展確率 (深さ方向)、き裂進展確率 (長さ方向)、き裂進展停止確率

である。

#### 4.4 き裂進展状況出力ファイル (File number = 27)

27 番ファイルには、き裂の進展および停止に関する情報が出力される。無限長き裂を使用している場合は、以下の項目が出力される。

- ・初期き裂深さ
- ・容器内表面フルエンス
- ・Cu, Ni, P, Si 含有率
- ・現在のき裂深さ
- ・き裂先端位置のフルエンス
- ・き裂先端位置の  $\Delta RT_{NDT}$
- ・ $K_I, K_{Ic}, K_{Ia}$

また、半楕円き裂を使用している場合は、以下の項目が出力される。

- ・初期き裂深さ、初期き裂長さ、初期き裂アスペクト比
- ・容器内表面フルエンス
- ・Cu, Ni, P, Si 含有率
- ・現在のき裂深さ、現在のき裂長さ、現在のアスペクト比
- ・き裂先端位置のフルエンス
- ・き裂先端位置の  $\Delta RT_{NDT}$ 、き裂表面位置の  $\Delta RT_{NDT}$
- ・き裂先端の  $K_I, K_{Ic}, K_{Ia}$
- ・き裂表面の  $K_I, K_{Ic}, K_{Ia}$

#### 4.5 R6 法破壊評価曲線出力ファイル (File number = 66)

R6 法を使用した際に算出される破壊評価曲線のパラメータ  $K_r, L_r$  等のデータを出力するファイルである。無限長き裂を対象とした場合の出力項目を以下にあげる。

- ・き裂採点番号
- ・き裂深さ
- ・き裂進展量
- ・ $L_r$
- ・ $K_r$
- ・現在の  $L_r$  の時にき裂の進展が開始する  $K_r$  の値
- ・カテゴリー

- $K_{mat}$

半楕円き裂を対象とした場合の出力項目を以下にあげる。

- き裂採点番号
- き裂深さ
- き裂進展量
- $L_r$
- き裂先端の  $K_r$
- 現在の  $L_r$  の時にき裂の進展が開始するき裂先端の  $K_r$  の値
- き裂先端のカテゴリー
- き裂先端の  $K_{mat}$
- き裂表面の  $K_r$
- 現在の  $L_r$  の時にき裂の進展が開始するき裂表面の  $K_r$  の値
- き裂表面のカテゴリー
- き裂表面の  $K_{mat}$

#### 4.6 決定論的解析結果出力ファイル (File number = 37)

決定論的解析を実施した場合の解析結果は No.37 ファイルに出力される。決定論的解析は、KIC/ $K_{Ia}$  破壊基準及び R6 法破壊基準の両方に適用できる。

破壊基準が  $K_{Ic}/K_{Ia}$  基準の場合について出力項目を以下に示す。このうち、過渡事象時刻以外の項目はき裂最深部の先端及び（半楕円き裂の）長さ方向の先端の値を出力する。

- 過渡事象時刻
- き裂寸法
- き裂先端温度
- き裂がない圧力容器のき裂先端位置における応力値
- き裂先端照射量
- き裂先端  $RT_{NDT}$
- き裂先端応力拡大係数
- き裂先端  $K_{Ic}$ 、 $K_{Ia}$

また、破壊基準が R6 法である場合の出力項目を以下に示す。

- 過渡事象時刻
- き裂寸法
- き裂先端温度

- ・き裂先端位置における全応力、1次応力、2次応力値
- ・き裂先端照射量
- ・き裂先端  $RT_{NDT}$
- ・き裂先端の全応力、1次応力、2次応力による応力拡大係数
- ・き裂先端の  $K_{mat}$  値
- ・き裂先端の  $K_r$  値
- ・き裂先端の  $L_r$  値
- ・き裂先端の破壊評価曲線の  $K_r$  値

## 5. ま と め

本報告書は、確率論的破壊力学コード PASCAL の使用方法を中心に、解析理論及び手法を取まとめたものである。

本コードは、安全研究年次計画（平成8年度～12年度）に基づき原研で実施している「経年軽水炉構造機器の健全性に関する研究」の一環として開発したものである。これまでの研究開発により、当初の目標は達成できたと考える。

本コードは、既存の VISA-II 及び OCA-P コードが有する機能をすべて備えるとともに、種々の新規機能や改良機能も用意しており、現時点では世界的にも最レベルの機能・性能を達成していると思われる。今後は、ユーザビリティの確認及び改善のための感度解析や実機圧力容器の信頼性評価を行うとともに、本分野の研究者・技術者への利用に供することにより、国内の標準コード化を図ることが重要である。

さらに、平成13年度以降では Phase II 研究として、

- ・照射脆化予測、破壊靱性評価、クラッドの経年変化評価等の原研における経年変化研究の成果の取り込み、
- ・埋没亀裂解析機能、高温予荷重効果の詳細解析機能等機能拡充
- ・配管や蒸気発生器の PFM 解析への適用拡大
- ・地震荷重に対する PFM 解析コード開発

を計画しており、確率論的構造機器信頼性解析システムの構築をめざしたい。

本コード開発を進めるにあたり、阿部清治原子炉安全工学部長並びに鈴木雅秀機器信頼性研究室長からご協力を賜った。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- [1] Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061 Vol.3, Nov. 1984
- [2] U.S. NRC Regulatory Guide 1.154 : Format and Content of Plant Specific Pressurized Thermal Shock Safety Analysis Reports for Pressurized Water Reactor , January 1987
- [3] Balkey, K. et al.: Documentation of Probabilistic Fracture Mechanics Codes Used for Reactor Pressure Vessels Subjected to Pressurized Thermal Shock Loading, Part1 and Part2, EPRI TR-105001, June 1995
- [4] Comparison Report of RPV Pressurized Thermal Shock International Comparative Assessment Study (PTS ICAS), NEA/CSNI/R(99)3, September 1999
- [5] K. Shibata, D. Kato and Y. Li: Development of PFM Code for Evaluating Reliability of Pressure Components Subjected to Transient Loading, Trans. 15<sup>th</sup> SMiRT, Vol.X, pp.X315-X322
- [6] Y. Li, D. Kato and K. Shibata: Sensitivity Analysis of Failure Probability on PTS Benchmark Problem of Pressure Vessel using a Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code, To be published in JSME International Journal, Jan.2001
- [7] K. Shibata, D. Kato and Y. Li: Introduction of Effect of Annealing into Probabilistic Fracture Mechanics Code and results of Benchmark Analyses, Presented in ASME PV and Piping Conference

2000, July 2000, Seattle

- [8] 柴田、鬼沢、李、加藤：焼鈍による原子炉容器の脆化回復挙動に関する確率論的破壊力学評価、日本機械学会 M&M2000 材料力学講演会講演論文集、2000 年 10 月
- [9] Milne, I, et al.: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEGB Report R/H/R6-Rev.3, 1986
- [10] Simonen, F.A., et al.: VISA-II- A Computer Code for Predicting the Probability of Reactor Pressure Vessel Failure, NUREG/CR-4486
- [11] Cheverton, R.D. and Ball, D.G.: OCA-P, A Deterministic and Probabilistic Fracture-Mechanics Code for Application to Pressure Vessels, NUREG/CR-3618, 1984

## 付録 1 プログラムの構成及び流れ

This is a blank page.



## A1.1 プログラムの構成

本プログラムは1つのメインルーチン、1つのコモンファイル及び285個のサブルーチンから構成される。各ファイル構成を以下に示す。

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その1

区分	備注	ファイル名	機能
メイン		Mainmain.f	解析全体の流れの管理
コモン		common.h	グローバル変数の設定
サブ		anneal.f	焼鈍および再脆化の情報の入力
サブ		anrert.f	焼鈍による $RT_{NDT}$ の回復と再脆化
サブ		anreus.f	焼鈍による上部糊融性値の回復と再脆化
サブ		arakawa.f	荒川式の計算
サブ		arexpo.f	初期き裂アスペクト比の存在確率の計算 (指数分布)
サブ		arest.f	き裂進展停止およびき裂再進展判定
サブ		averg.f	線形補間ルーチン
サブ		avr1d.f	1次補間ルーチン
サブ		beta.f	ベータ関数算出ルーチン
サブ		betacf.f	ベータ関数算出ルーチン (不完全、連分数)
サブ		betai.f	ベータ関数算出ルーチン (不完全)
サブ		calcfs.f	上部糊融性値の回復後相当フルエンスの算出
サブ		calcft.f	焼鈍による $RT_{NDT}$ の回復後相当フルエンスの算出
サブ		calckr.f	R6法の $K_{Ic}$ パラメータの算出
サブ		calclr.f	R6法の $L_{Ic}$ パラメータの算出
サブ		cannr1.f	焼鈍後のパラメータ算出 (第1回目用)
サブ		cannr2.f	焼鈍後のパラメータ算出 (第2回目以降用)
サブ		cannu1.f	焼鈍による上部糊融性値の低下
サブ		cardin.f	入力データの読み込み制御
サブ		caspcr.f	半楕円き裂のき裂平面等分割に関する入力
サブ		caspcu.f	半楕円き裂のき裂平面ユーザー分割に関する入力
サブ		cdepth.f	重み付きモンテカルロ法の解析パラメータ入力
サブ		cdrtud.f	$\Delta RT_{NDT}$ の算出 (データベースより)
サブ		cexl.f	非破壊検査検出判定 (LLNLモデル)
サブ		cfue.f	中性子照射量の肉厚内減衰量計算
サブ		ckiaja.f	$K_{Ia}$ の算出 (JEAC4206評価式)
サブ		ckiaud.f	$K_{Ia}$ の算出 (データベースより)
サブ		ckicud.f	$K_{Ic}$ の算出 (データベースより)
サブ		ckiud.f	$K_{I1}$ の算出 (データベースより)
サブ		ckmat.f	R6法の $K_{mat}$ の算出
サブ		ckmtjr.f	J-R評価式を用いた $K_{mat}$ の算出
サブ		ckomeg.f	R6法の $K_{\Omega}$ の算出

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その2

区分	備注	ファイル名	機能
サブ		ckout2.f	き裂進展開始情報の出力 (その1)
サブ		ckout3.f	き裂進展開始情報の出力 (その2)
サブ		ckprm.f	き裂探点のためのパラメータの設定
サブ		clack.f	クラッド付き無限長き裂の応力拡大係数の切替え寸法の入力
サブ		Cntprm.f	カウント出力のデータ入力
サブ		comt0.f	感度解析用連続計算機能のパラメータ入力 (その1)
サブ		cont1.f	感度解析用連続計算機能のパラメータ入力 (その2)
サブ		Copper.f	Cuの含有率の決定
サブ		correl.f	$K_{Ic}$ - $K_{IIc}$ の相関係数の入力
サブ		count.f	カウンタ加算ルーチン
サブ		cpntki.f	無限長き裂に対する影響関数式
サブ		cprog.f	き裂進展刻み量算出
サブ		Cracka.f	き裂深さの指数分布の入力
サブ		Crackb.f	き裂アスペクト比の対数正規分布の入力
サブ		Crkaud.f	深さ方向き裂存在確率のユーザー定義分布の入力
サブ		Crkbex.f	初期き裂アスペクト比分布 (指数分布) の入力
サブ		Crkbud.f	初期き裂アスペクト比存在確率のユーザー定義分布の入力
サブ		crkfix.f	初期き裂深さ&長さを固定した場合のデータ入力
サブ		Csigma.f	偏差計算ルーチンの呼び出し
サブ		csmsb.f	R6法に関連した容器肉厚全断面の膜・曲げ応力の計算
サブ		ctchk.f	感度解析用連続計算の実施判定
サブ		ctemp.f	任意時刻、任意位置における温度の算出
サブ		d3kicd.f	軸方向のき裂に作用する内圧による応力分布の算出
サブ		d3sai2.f	3次多項式計算用関数
サブ		defile2.f	使用ファイルの定義
サブ		Depdiv.f	深さ方向のき裂存在確率の区間分割
サブ		Depprb.f	深さ方向のき裂存在確率の算出
サブ		drtndt.f	$\Delta RT_{NDT}$ の算出
サブ		drtud.f	$\Delta RT_{NDT}$ データテーブルの入力
サブ		Dtmake.f	データテーブル作成
サブ		Dtcrk.f	決定論的解析の初期き裂寸法の計算
サブ		Dtpsmk.f	圧力テーブル作成
サブ		Dtssmk.f	応力テーブル作成
サブ		Dtssmk0.f	膜・曲げ応力テーブル作成
サブ		Dtssmk1.f	3次多項式応力テーブル作成
サブ		Dtssmk2.f	離散点応力テーブル作成
サブ		dtmmk.f	時間テーブル作成
サブ		Dttmpk.f	温度テーブル作成
サブ		Dupsen.f	シャルピー上部糊吸収エネルギーの減少量算出
サブ		Dusmif.f	上部糊弾性値の減少量算出

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その3

区分	備注	ファイル名	機能
サブ		echo.f	入力データのエコー出力
サブ		envir.f	環境設定ルーチンの呼び出し
サブ		erkia.f	$K_{Ia}$ の偏差算出
サブ		erkic.f	$K_{Ic}$ の偏差算出
サブ		err1.f	コマンドカード読み込みエラー処理
サブ		err2.f	カードイメージ読み込みエラー処理
サブ		err3.f	カードイメージの不適切入力に対するエラー処理 (その1)
サブ		err4.f	カードイメージの不適切入力に対するエラー処理 (その2)
サブ		errc1.f	連続解析用エラー出力 (その1)
サブ		errc2.f	連続解析用エラー出力 (その2)
サブ		errf.f	$\Delta RT_{NDT}$ 算出用誤差関数計算ルーチン
サブ		errfc.f	対数正規分布算出用誤差関数計算ルーチン
サブ		errtn.f	$RT_{NDT}$ の偏差算出
サブ		errwar.f	入力エラーとワーニングの総数の出力
サブ		exam.f	非破壊検査 (VISA-IIモデル) のパラメータ入力
サブ		Examar.f	非破壊検査 (荒川式) のパラメータ入力
サブ		examll.f	非破壊検査 (LLNLモデル) のパラメータ入力
サブ		expomx.f	採点されるき裂の最大値の決定 (指数分布の場合)
サブ		Expone.f	き裂存在確率の決定 (深さ方向)
サブ		fackr.f	R6法の破壊評価曲線の算出
サブ		fclose.f	ファイルのクローズ
サブ		fcoun.f	き裂進展・停止数のカウント
サブ		fdrud.f	中性子照射量の炉壁内減衰率のデータテーブル入力
サブ		finit.f	長さ方向にき裂が進展した場合のデータ入力
サブ		flag.f	フラグデータの入力
サブ		flgtbl.f	カードイメージフラグテーブル
サブ		fluenc.f	中性子照射量の計算
サブ		fnchk.f	連続解析用ファイル名のチェック
サブ		fnset.f	ファイルのセット
サブ		fparai.f	軸方向無限長き裂に対するPASCALの $K_I$ の補正係数
サブ		Fparaic.f	周方向無限長き裂に対するPASCALの $K_I$ の補正係数
サブ		gammln.f	ガンマ関数の対数算出ルーチン
サブ		Gaudel.f	ガウスの消去法ルーチン
サブ		i27out.f	き裂進展状況出力ファイル
サブ		i37out.f	決定論的解析の各変数の計算出力
サブ		i66out.f	R6法の解析状況出力ファイル (その2)
サブ		i66out2.f	R6法の解析状況出力ファイル (その2)
サブ		i66out3.f	R6法の解析状況出力ファイル (その3)
サブ	改良	inichk.f	き裂進展の判定
サブ		initia.f	き裂進展後のき裂寸法の算出
サブ	改良	initil.f	変数の初期設定

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その4

区分	備注	ファイル名	機能
サブ		inorm.f	正規分布の積分値算出ルーチン
サブ		jeacki.f	JEAC4206 $K_I$ 式
サブ		jeacst.f	JEAC4206式係数テーブル
サブ		kanto.f	関東式を用いた応力拡大係数の算出
サブ		kantst.f	関東式のパラメータセット
サブ		kiaud.f	$K_{Ia}$ データテーブルの入力
サブ		kicud.f	$K_{Ic}$ データテーブルの入力
サブ		kiud.f	無限長き裂の応力拡大係数のユーザー入力
サブ		kr1rss.f	任意時間における1次、2次応力の算出
サブ		Lognom.f	対数正規分布の算出
サブ		lr1calc.f	軸方向のき裂に作用する $Lr$ 応力算出
サブ		matral.f	評価対象材料の物性および成分の入力
サブ		mesh.f	層別モンテカルロ法の初期き裂平面の決定
サブ		Meshdv.f	初期き裂平面の分割
サブ		mh1jr.f	J-R曲線算出
サブ		Mixedc.f	クラッド付き周方向無限長き裂応力拡大係数の計算
サブ		Mixedl.f	クラッド付き軸方向無限長き裂応力拡大係数の計算
サブ		mmsai2.f	データテーブルを膜・曲げ応力に変換 (最小2乗法)
サブ		mmsai22.f	改良型逐次膜・曲げ用最小2乗法 (1次)
サブ		mshfit.f	自動調整層別モンテカルロ法の階層間隔最適化
サブ		Mshset.f	自動調整層別モンテカルロ法の階層情報セット
サブ		newraj.f	Newman-Raju式を用いた応力拡大係数の算出
サブ		nickel.f	Niの含有率の決定
サブ		Normal.f	正規分布に基づく偏差の算出
サブ		octavi.f	OCTAVIA分布使用時のき裂存在確率算出
サブ		osr637.f	R6法の決定論解析のときの応力計算
サブ		osr6372.f	R6法の決定論解析のときの応力計算 (応力がDTで入力する場合)
サブ		ostr37.f	$K_{Ic}/K_{Ia}$ 基準の決定論解析のときの応力計算
サブ		ostr372.f	$K_{Ic}/K_{Ia}$ 基準の決定論解析の応力計算 (応力がDTで入力する場合)
サブ		outpst.f	き裂進展情報の出力制御
サブ		output.f	計算結果の出力制御
サブ		parai.f	無限長き裂、軸方向応力拡大係数パラメータセット
サブ		paraic.f	無限長き裂、周方向応力拡大係数パラメータセット
サブ		p1calc.f	軸方向のき裂に作用する内圧による応力分布の算出
サブ		p1calc.f	破壊確率などの算出
サブ		p1fn.f	解析部分の制御ルーチン
サブ		Phosph.f	Pの含有率の決定
サブ		pinst.f	塑性崩壊の計算
サブ		pond.f	非破壊検査のき裂検出確率制御
サブ		Presfm.f	内圧時刻歴の入力 (4次多項式)
サブ		prespt.f	内圧時刻歴の入力 (データテーブル)

## A1.1 プログラム構成ファイル説明 その5

区分	ファイル名	機能
サブ	Pmnset.f	感度解析用連続計算入力パラメータの変数へのセット
サブ	psstrs.f	1次、2次応力等の算出
サブ	psstrs0.f	膜・曲げ応力に対する1次、2次応力等の算出
サブ	psstrs1.f	3次多項式応力に対する1次、2次応力等の算出
サブ	psstrs2.f	離散点応力に対する1次、2次応力等の算出
サブ	psurf.f	非破壊検査 (VISA-IIモデル) のき裂検出確率
サブ	pvolm.f	非破壊検査 (PISCモデル) のき裂検出確率
サブ	r6ctg2.f	R6法カテゴリ-2の $K_0$ 最大値データベース入力
サブ	r6inp.f	R6法のパラメータ入力
サブ	r6komg.f	R6法カテゴリ-2, 3の $K_0$ 分布データの入力
サブ	r6opt2.f	R6法オプション2の応力歪み曲線データの入力
サブ	Random.f	乱数の発生
サブ	Remesh.f	自動調整層別モンテカルロ法の階層区間分割最適化制御
サブ	resstr.f	残留応力分布の入力 (3次多項式)
サブ	sacrk.f	アスペクト比一定または長さ一定の半楕円き裂の採点
サブ	Sbsnm.f	応力の逐次膜・曲げ変換
サブ	Sbsnm2.f	応力の逐次膜・曲げ変換 (改良型)
サブ	sbsnms.f	応力の逐次膜・曲げ変換 (改良型、算出ルーチン)
サブ	sdtm.f	決定論的解析する場合の確率変数を一定値とする
サブ	search.f	入力カードイメージのエラーチェック制御
サブ	secrk.f	アスペクト比変化の半楕円き裂の採点
サブ	serc1.f	#TITLEエラーチェック
サブ	serc10.f	#CRACKBエラーチェック
サブ	serc11.f	#CDEPTHエラーチェック
サブ	serc12.f	#CASPCTエラーチェック
サブ	serc13.f	#CASPCUエラーチェック
サブ	serc14.f	#MATRALエラーチェック
サブ	serc15.f	#FINITエラーチェック
サブ	serc16.f	#EXAMエラーチェック
サブ	serc17.f	#OUTPRMエラーチェック
サブ	serc18.f	#TBLPRMエラーチェック
サブ	serc19.f	#CRKAUDエラーチェック
サブ	serc2.f	#FLAGエラーチェック
サブ	serc20.f	#CRKBUDエラーチェック
サブ	serc21.f	#KIUDエラーチェック
サブ	serc22.f	#CRKBEXエラーチェック
サブ	serc23.f	#KICUDエラーチェック
サブ	serc24.f	#KIAUDエラーチェック
サブ	serc25.f	#DRTUDエラーチェック
サブ	serc26.f	#FDRUDエラーチェック

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その6

区分	ファイル名	機能
サブ	serc27.f	#EXAMLLエラーチェック
サブ	serc28.f	#R6エラーチェック
サブ	serc29.f	#R6OPT2エラーチェック
サブ	serc3.f	#VESSELエラーチェック
サブ	serc30.f	#R6KOMGエラーチェック
サブ	serc31.f	#R6CTG2エラーチェック
サブ	serc32.f	#STRS3Dエラーチェック
サブ	serc34.f	#SSAUTOエラーチェック
サブ	serc35.f	#CORRELエラーチェック
サブ	serc36.f	#ANNEALエラーチェック
サブ	serc37.f	#STRSDTエラーチェック
サブ	serc38.f	#RESSTRエラーチェック
サブ	serc39.f	#CRKFIXエラーチェック
サブ	serc4.f	#TRANSエラーチェック
サブ	serc40.f	#EXAMARエラーチェック
サブ	serc41.f	#CLADKエラーチェック
サブ	serc5.f	#TEMPエラーチェック
サブ	serc6.f	#STRESSエラーチェック
サブ	serc7.f	#PRESFMエラーチェック
サブ	serc8.f	#PRESPTエラーチェック
サブ	serc9.f	#CRACKAエラーチェック
サブ	setcrk.f	き裂採点制御
サブ	setprl0.f	Lr応力のセット
サブ	setpst0.f	膜・曲げ応力に対する1次応力のセット
サブ	setpst1.f	3次多項式応力に対する1次応力のセット
サブ	setpst2.f	離散点応力に対する1次応力のセット
サブ	setstr21.f	3次応力分布から離散応力データテーブルの換算
サブ	setstr.f	カードイメージの不適切入力対処用文字列設定
サブ	setsst0.f	膜・曲げ応力に対する2次応力のセット
サブ	setsst1.f	3次多項式応力に対する2次応力のセット
サブ	setsst2.f	離散点応力に対する2次応力のセット
サブ	setstr.f	応力のセットの制御
サブ	setstr0.f	膜・曲げ応力のセット
サブ	setstr1.f	3次多項式応力のセット
サブ	setstr2.f	離散点応力のセット
サブ	settmp.f	温度のセット
サブ	sev2ki.f	半楕円き裂に対するVISA-II応力拡大係数算出
サブ	sev2pm.f	半楕円き裂に対するVISA-II応力拡大係数パラメータセット
サブ	sfcrk.f	深さ&長さ固定の場合のき裂採点

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その7

区分	備注	ファイル名	機能
サブ		shirat.f	白鳥式を用いた応力拡大係数算出
サブ		shirst.f	白鳥式のパラメータセット
サブ		silico.f	Siの含有率の決定
サブ		ski.f	応力拡大係数算出制御
サブ		skia.f	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の算出
サブ		skia2.f	破壊靱性値 $K_{Ia}$ の算出 (グラフデータ用)
サブ		skic.f	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の算出
サブ		skic2.f	破壊靱性値 $K_{Ic}$ の算出 (グラフデータ用)
サブ		skicd2.f	クラッドを考慮した $K_I$ 算出 (簡略法) 半楕円き裂
サブ		skii.fc.f	応力拡大形数算出(周方向無限長き裂)
サブ		skii.fl.f	応力拡大形数算出(軸方向無限長き裂)
サブ		skise.f	応力拡大形数算出(半楕円き裂)
サブ		slcrk.f	無限長き裂のき裂採点
サブ		smpfit.f	自動調整層別モンテカルロ法の採点数の最適化
サブ		smpset.f	自動調整層別モンテカルロ法の最適化された採点数のセット
サブ		spkicd.f	クラッドを考慮した $K_I$ 算出 (簡略法) 無限長き裂
サブ		spntki.f	無限長き裂に対する影響関数式 $K_I$ 算出
サブ		ssauto.f	自動調整層別モンテカルロ法パラメータ入力
サブ		stress.f	応力分布の時刻歴入力 (膜・曲げ応力)
サブ		strs3d.f	応力分布の時刻歴入力 (3次多項式)
サブ		strsdt.f	応力のデータテーブル入力
サブ		tblprm.f	表出力の形式入力
サブ		temp.f	温度分布時刻歴入力
サブ		title.f	解析タイトルの入力
サブ		trans.f	過渡事象データ入力
サブ		ttlwrt.f	プログラムタイトルの出力
サブ		usrasp.f	長さ方向ユーザー定義分布使用時のき裂存在確率算出
サブ		usrdep.f	深さ方向ユーザー定義分布使用時のき裂存在確率算出
サブ		v2kicd.f	クラッドを考慮したVISA-IIの応力拡大係数の算出式
サブ		vessel.f	圧力容器データの入力
サブ		wdata.f	破壊個数等の解析結果出力
サブ		wginf.f	無限長き裂、き裂進展ヒストグラム出力
サブ		wgjr.f	J-R曲線のグラフ出力
サブ		wgki.f	$K_I$ のデータ出力
サブ		wgia.f	$K_{Ia}$ のデータ出力
サブ		wgkic.f	$K_{Ic}$ のデータ出力
サブ		wgnumb.f	半楕円き裂、各階層ごとの破壊個数等出力
サブ		wgpos.f	出力する位置の決定
サブ		wgprob.f	半楕円き裂、各階層ごとの破壊確率等出力
サブ		wgraph.f	表形式の出力項目の制御

表 A1.1 プログラム構成ファイル説明 その 8

区分	備注	ファイル名	機能
サブ		wgrate.f	半楕円き裂、各階層ごとの破壊割合等出力
サブ		wgsscs.f	自動調整層別モンテカルロ法における採点数の出力
サブ		wgstr.f	応力分布の出力
サブ		wgstr2.f	DB応力から特定位置および時間の応力を算出
サブ		Wgtemp.f	温度分布の出力
サブ		wgwt.f	半楕円き裂、各階層ごとの重み出力
サブ		write1.f	き裂の採点のためのパラメータ出力
サブ		write2.f	き裂の進展刻み位置の出力
サブ		zcl2.f	連続計算用感度解析機能を用いる際のゼロクリアー
サブ		zclear.f	全パラメータのゼロクリアー



A1.2 プログラム流れ

A1.2.1 プログラムツリー図

プログラムのツリー図を以下に示す。

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 MAIN	+ZCLEAR							
2	+ENWIR	+INITIL						
3	+DEFILE2							
4	+TILWRT							
5	+CTCHK	+ECHO						
6		+DEFILE2 (3,2)						
7		+ERRC1						
8	+FNCHK	+ERRC1 (7,3)						
9	+CARDIN	+FLGTBL						
10		+TITLE	+ERR2	+FLGTBL (9,3)				
11		+FLAG	+ERR2 (10,4)					
12		+VESSEL	+ERR2 (10,4)					
13		+TRANS	+ERR2 (10,4)					
14		+TEMP	+ERR2 (10,4)					
15		+STRESS	+ERR2 (10,4)					
16		+PRESFM	+ERR2 (10,4)					
17		+PRESPT	+ERR2 (10,4)					
18		+CRACKA	+ERR2 (10,4)					
19		+CRACKB	+ERR2 (10,4)					
20		+CDEPTH	+ERR2 (10,4)					
21		+CASPC1	+ERR2 (10,4)					
22		+CASPC2	+ERR2 (10,4)					
23		+MATRAL	+ERR2 (10,4)					
24		+FINIT	+ERR2 (10,4)					
25		+EXAM	+ERR2 (10,4)					
26		+ONIPRM	+ERR2 (10,4)					
27		+TBLPRM	+ERR2 (10,4)					
28		+CRKAUD	+ERR2 (10,4)					
29		+CRKBUD	+ERR2 (10,4)					
30		+KIUD	+ERR2 (10,4)					
31		+CRKBEX	+ERR2 (10,4)					
32		+KICUD	+ERR2 (10,4)					
33		+KIAUD	+ERR2 (10,4)					
34		+DRITUD	+ERR2 (10,4)					
35		+FDRIUD	+ERR2 (10,4)					
36		+EXAMLL	+ERR2 (10,4)					
37		+R6INP	+ERR2 (10,4)					
38		+R6OPT2	+ERR2 (10,4)					
39		+R6KDMG	+ERR2 (10,4)					
40		+R6CTG2	+ERR2 (10,4)					
41		+STRS3D	+ERR2 (10,4)					
42		+CONTO						
43		+CONT1	+PRMSET	+ERRC2	+FLGTBL (9,3)			
44				+ZCL2				
45				+ERRC1 (7,3)				
46				+ERR2 (10,4)				
47		+SSAUTO	+ERR2 (10,4)					
48		+CORREL	+ERR2 (10,4)					
49		+ANNEAL	+ERR2 (10,4)					
50		+STRSDT	+ERR2 (10,4)					
51		+RESSTR	+ERR2 (10,4)					
52		+CRKFIX	+ERR2 (10,4)					
53		+EXAMAR	+ERR2 (10,4)					
54		+CLADK	+ERR2 (10,4)					
55		+ERR1	+FLGTBL (9,3)					
56	+SEARCH	+TILWRT (4,2)						
57		+SERC1						
58		+SERC2	+ERR3	+SETSR				
59				+FLGTBL (9,3)				
60		+SERC3	+ERR3 (58,4)					
61			+ERR4	+SETSR (58,5)				
62				+FLGTBL (9,3)				
63		+SERC4	+ERR3 (58,4)					
64			+ERR4 (61,4)					
65			+WRITE2	+ERR4 (61,4)				

66		+SERC5	+-ERR4 (61, 4)
67		+SERC6	+-ERR4 (61, 4)
68		+SERC32	+-ERR4 (61, 4)
69		+SERC37	+-ERR4 (61, 4)
70		+SERC38	
71		+SERC7	+-ERR4 (61, 4)
72		+SERC8	+-ERR4 (61, 4)
73		+SERC9	+-ERR4 (61, 4)
74		+SERC41	
75		+SERC19	+-ERR4 (61, 4)
76		+SERC10	+-ERR4 (61, 4)
77		+SERC20	+-ERR4 (61, 4)
78		+SERC22	+-ERR4 (61, 4)
79		+SERC21	+-ERR4 (61, 4)
80		+SERC23	+-ERR4 (61, 4)
81		+SERC24	+-ERR4 (61, 4)
82		+SERC39	+-ERR4 (61, 4)
83		+SERC25	+-ERR4 (61, 4)
84		+SERC26	+-ERR4 (61, 4)
85		+SERC11	+-ERR4 (61, 4)
86		+SERC12	+-ERR4 (61, 4)
87		+SERC13	+-ERR4 (61, 4)
88		+SERC34	+-ERR4 (61, 4)
89		+SERC14	+-ERR3 (58, 4)
90			+-ERR4 (61, 4)
91		+SERC35	+-ERR4 (61, 4)
92		+SERC15	+-ERR4 (61, 4)
93		+SERC16	+-ERR4 (61, 4)
94		+SERC27	
95		+SERC40	
96		+SERC28	+-ERR3 (58, 4)
97			+-ERR4 (61, 4)
98		+SERC29	+-ERR4 (61, 4)
99		+SERC30	+-ERR4 (61, 4)
100		+SERC31	+-ERR4 (61, 4)
101		+SERC36	
102		+SERC17	+-ERR4 (61, 4)
103		+SERC18	+-ERR4 (61, 4)
104		+ERRWAR	
105		+FNSET	+-DEFIL2 (3, 2)
106		+PFM	+CKPRM
107			+-DEPDIV
108			+-EXPOMX
109			+-DEPPRB
110			+-EXPONE
111			+-OCTAVI
112			+-MESH
113			+-MESHIV
114			+-EXPONE (107, 5)
115			+-OCTAVI (108, 5)
116			+-USRDEP
117			+-LOGNOM
118			+-ERRPC
119			+-AREXPO
120			+-USRASP
121			+-WRITE1
122		+SHIRST	
123		+KANTST	
124		+JEACST	
125		+SOTM	
126		+DTMAKE	+-DTMMK
127			+-DTPMK
128			+-AVERG
129			+-DTPSMK
130			+-AVERG (122, 5)
131			+-DTSSMK
132			+-DTSSMK0
133			+-AVERG (122, 5)
134			+-DTSSMK1
135			+-AVERG (122, 5)
136			+-DTSSMK2
137			+-AVERG (122, 5)
138		+PSSTRS	+-PSSTRS0
139			+-PCALC
140			+-MMSAI2
141			+-D3SAI2
142			+-GAUDEL
143			+-D3CALC
144			+-PSSTRS1
145			+-PCALC (127, 5)
146			+-LRCALC
147			+-MMSAI2 (127, 6)
148			+-PSSTRS2
149			+-MMSAI2 (127, 6)
150		+I66OUT	
151		+SETCRK	+-SLCRK
152			+-RANDOM
153			+-SECRK
154			+-RANDOM (134, 5)
155			+-SACRK
156			+-RANDOM (134, 5)
157			+-SFCRK
158		+DTMCRK	+-SECRK (135, 4)
159		+COUNT	
160		+POND	+-PSURF
161			+-RANDOM (134, 5)

141		+CELL	+INORM						
142			+RANDOM	(134, 5)					
143		+ARAKAWA	+INORM	(141, 5)					
144			+RANDOM	(134, 5)					
145		+PVOLM	+RANDOM	(134, 5)					
146	+COPPER	+NORMAL	+RANDOM	(134, 5)					
147	+NICKEL	+NORMAL	(146, 4)						
148	+PHOSPH	+NORMAL	(146, 4)						
149	+SILICO	+NORMAL	(146, 4)						
150	+FLUENC	+NORMAL	(146, 4)						
151	+CSIGMA	+ERRTN	+NORMAL	(146, 4)					
152		+ERKIC	+NORMAL	(146, 4)					
153		+ERKIA	+NORMAL	(146, 4)					
154	+CFJUE	+AVERG	(122, 5)						
155	+DRTNDT	+ERRF							
156		+DRTUD	+AVERG	(122, 5)					
157	+DUSMIF								
158	+CANNRI	+DRTNDT	(155, 3)						
159		+ANRERT	+AVERG	(122, 5)					
160		+CALCFT							
161	+CANNUI	+CFJUE	(154, 3)						
162		+ANRELS	+DUPSEN						
163		+CALCFS							
164		+DUSMIF	(157, 3)						
165	+FCOUNT	+COUNT	(139, 3)						
166	+I37OUT	+SETSTR	+SETSTRO						
167		+SETSTR1	+SBSMM	+MMSAI2	(127, 6)				
168			+SBSMM2	+SBSMMS	+MMSAI22				
169		+SETPST0							
170		+SETSSST0							
171		+SETPST1	+SBSMM	(167, 6)					
172			+SBSMM2	(168, 6)					
173		+SETSSST1	+SBSMM	(167, 6)					
174			+SBSMM2	(168, 6)					
175		+SETSTR2							
176		+SETPST2							
177		+SETSSST2							
178		+SETSTR21							
179	+OSTR37	+OSTR372	+AVERG	(122, 5)					
180	+OSR637	+OSR6372	+AVERG	(122, 5)					
181		+CSMSB	+MMSAI2	(127, 6)					
182	+SETTMP	+CTEMP	+AVERG	(122, 5)					
183	+DRTNDT	(155, 3)							
184	+DUSMIF	(157, 3)							
185	+CFJUE	(154, 3)							
186	+FLUENC	(150, 3)							
187	+CANNRI	(158, 3)							
188	+CANNUI	(161, 3)							
189	+SKIC	+CKICUD	+AVERG	(122, 5)					
190	+SKIA	+CKIAUD	+AVERG	(122, 5)					
191		+CKIAJA							
192	+CQMAT	+SKIC	(189, 4)						
193		+SKIA	(190, 4)						
194		+CKOMEG	+AVERG	(122, 5)					
195		+AVERG	(122, 5)						
196	+CKMTJR	+SKIC	(189, 4)						
197		+MILJR							
198		+NURBJR							
199		+SKIA	(190, 4)						
200	+SKI	+SKIIFC	+PARAIC						
201		+CKIUD	+AVERG	(122, 5)					
202		+FPARAIC							
203		+SPKICD							
204		+DSKICD	+PARAIC	(200, 6)					
205			+PARAI						
206		+MIXEDC	+CPNTKI	+SPNTKI	+BETAI	+GAMMLN			
207					+BETACF	+GAMMLN			
208					+BETA	+GAMMLN			
209			+FPARAIC	(202, 6)					
210			+PARAIC	(200, 6)					
211			+CPNTKI	(206, 7)					
212		+SKIIFL	+PARAI	(205, 7)					
213			+CKIUD	(201, 6)					
214			+FPARAI						
215			+SPKICD	(203, 6)					

216				+DKICD (204, 6)
217				+MIXEDL +-CPNTKI (206, 7)
218				+FPARAI (214, 6)
219				+PARAI (205, 7)
220				+CPNTKI (206, 7)
221			+SKISE	+NEWRAJ
222				+SHIRAT
223				+SEV2KI +-PARAIC (200, 6)
224				+PARAI (205, 7)
225				+SEV2PM
226				+KANTO
227				+JEACKI +-AVRID +-AVERG (122, 5)
228				+SKICD2 +-NEWRAJ (221, 6)
229			+CALOKR +-SKI (200, 4)	
230			+CALCLR	
231			+FACKR +-AVERG (122, 5)	
232	+INCHK	+SETSTR (166, 4)		
233		+SETTMP (182, 4)		
234		+SKIC (189, 4)		
235		+SKI (200, 4)		
236		+CKMAT (192, 4)		
237		+CKMTJR (196, 4)		
238		+CALOKR (229, 4)		
239		+CALCLR (230, 4)		
240		+FACKR (231, 4)		
241	+I66OUT2			
242	+I27OUT	+CKOUT2		
243		+CKOUT3		
244	+INITIA	+CPRG		
245		+PINST		
246		+COUNT (139, 3)		
247		+FCOUNT (165, 3)		
248	+CANNR2	+DRTNDT (155, 3)		
249		+ANRERT (159, 4)		
250	+ARREST	+SETSTR (166, 4)		
251		+SETTMP (182, 4)		
252		+SKIC (189, 4)		
253		+SKI (200, 4)		
254		+CKMAT (192, 4)		
255		+CKMTJR (196, 4)		
256		+CALOKR (229, 4)		
257		+CALCLR (230, 4)		
258		+FACKR (231, 4)		
259		+SKIA (190, 4)		
260	+I66OUT3			
261	+OUTPST			
262	+CKOUT3 (243, 4)			
263	+PPCALC			
264	+REMESH	+MSHSET +-EXPONE (107, 5)		
265		+OCTAVI (108, 5)		
266		+USRDEP (112, 5)		
267		+LOGNOM (113, 5)		
268		+AREXPO (114, 5)		
269		+USRASP (115, 5)		
270		+WRITEI (116, 4)		
271		+MSHFIT		
272	+SMPSET	+SMPFIT		
273	+OUTPUT	+WDATA		
274		+WGRAPH +-WGPOS		
275		+WCTEMP +-CTEMP (182, 5)		
276		+WGSTR +-WGSTR2 +-AVERG (122, 5)		
277		+WKIC +-CFLUE (154, 3)		
278		+DRTNDT (155, 3)		
279			+DUSMIF (157, 3)	
280			+CANNR2 (248, 3)	
281			+CANNU1 (161, 3)	
282			+SKIC2 +-CTEMP (182, 5)	
283			+CKICUD (189, 5)	
284		+WKIA +-CFLUE (154, 3)		
285		+DRTNDT (155, 3)		
286		+DUSMIF (157, 3)		
287		+CANNR2 (248, 3)		
288		+CANNU1 (161, 3)		
289			+SKIA2 +-CTEMP (182, 5)	

290			+CKIAUD (190, 5)
291			+CKIAJA (191, 5)
292		+WGJR	+CFLUE (154, 3)
293			+CTEMP (182, 5)
294			+MHLJR (197, 5)
295			+NURREGJR (198, 5)
296		+WGKI	+SESM1 (167, 6)
297			+SETSTR21 (178, 5)
298			+SKI (200, 4)
299			+SESM2 (168, 6)
300		+WGINF	
301		+WGSSCS	
302		+WGWT	
303		+WGNAME	
304		+WGRATE	
305		+WGPROB	
306	+PCLOSE		

A1.2.2 プログラムの流れ

(1) 全体のフロー図

本プログラムの全体のフローを図 A1.1 に示す。

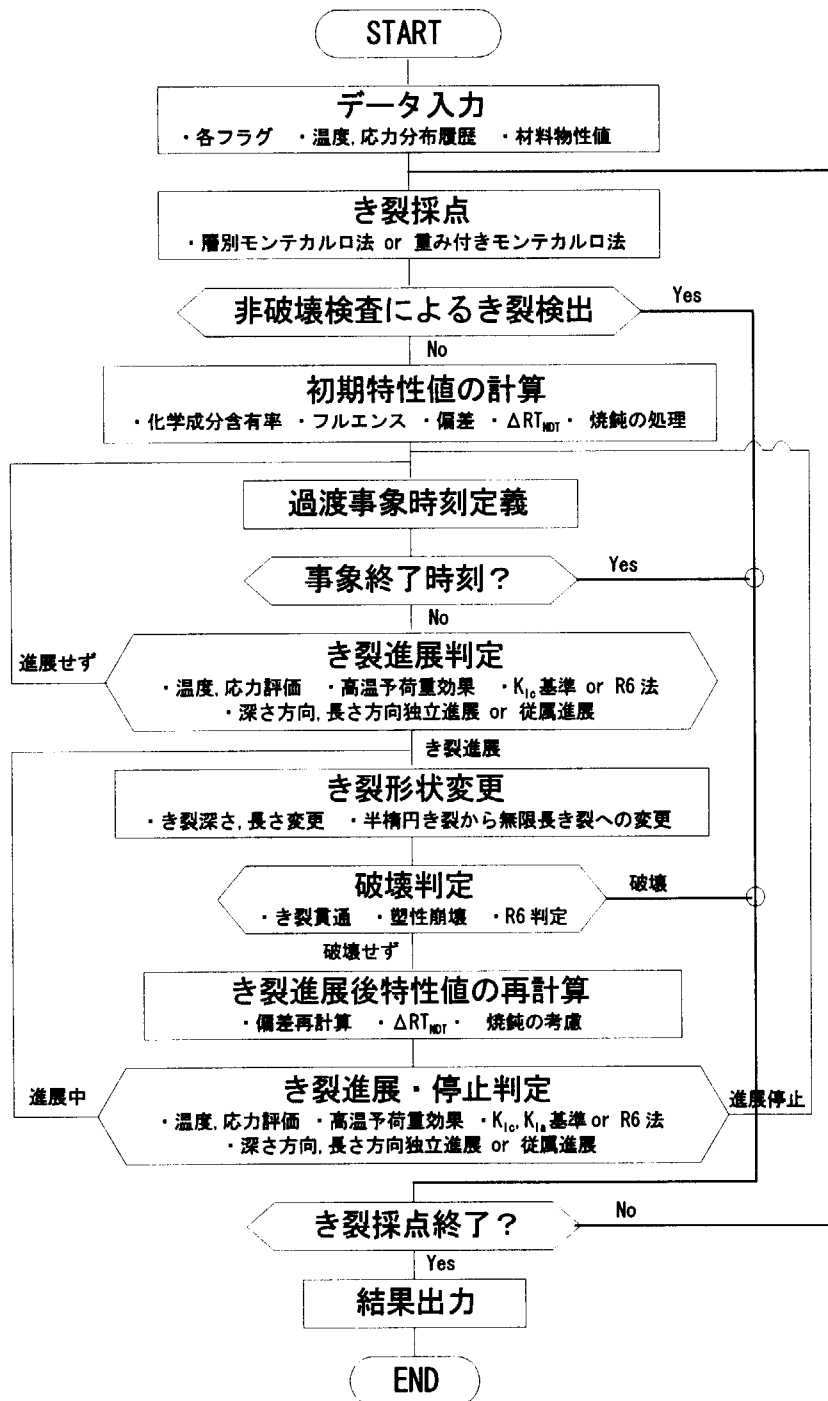


図 A1.1 本プログラム全体のフロー図

(2) 無限長き裂解析のフロー図

無限長き裂解析のフローを図 A1.2 に示す。

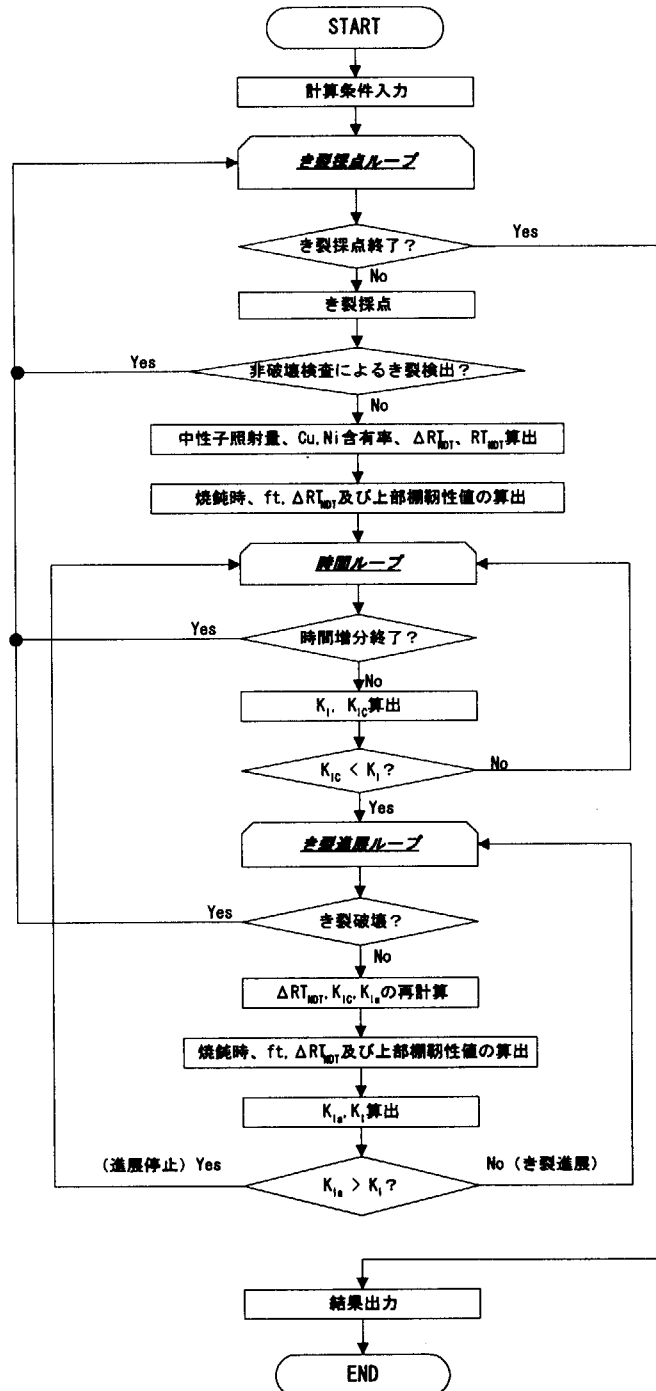


図 A1.2 無限長き裂解析のフロー図

(3) 半楕円き裂解析のフロー図

半楕円き裂解析のフローを図 A1.3 に示す

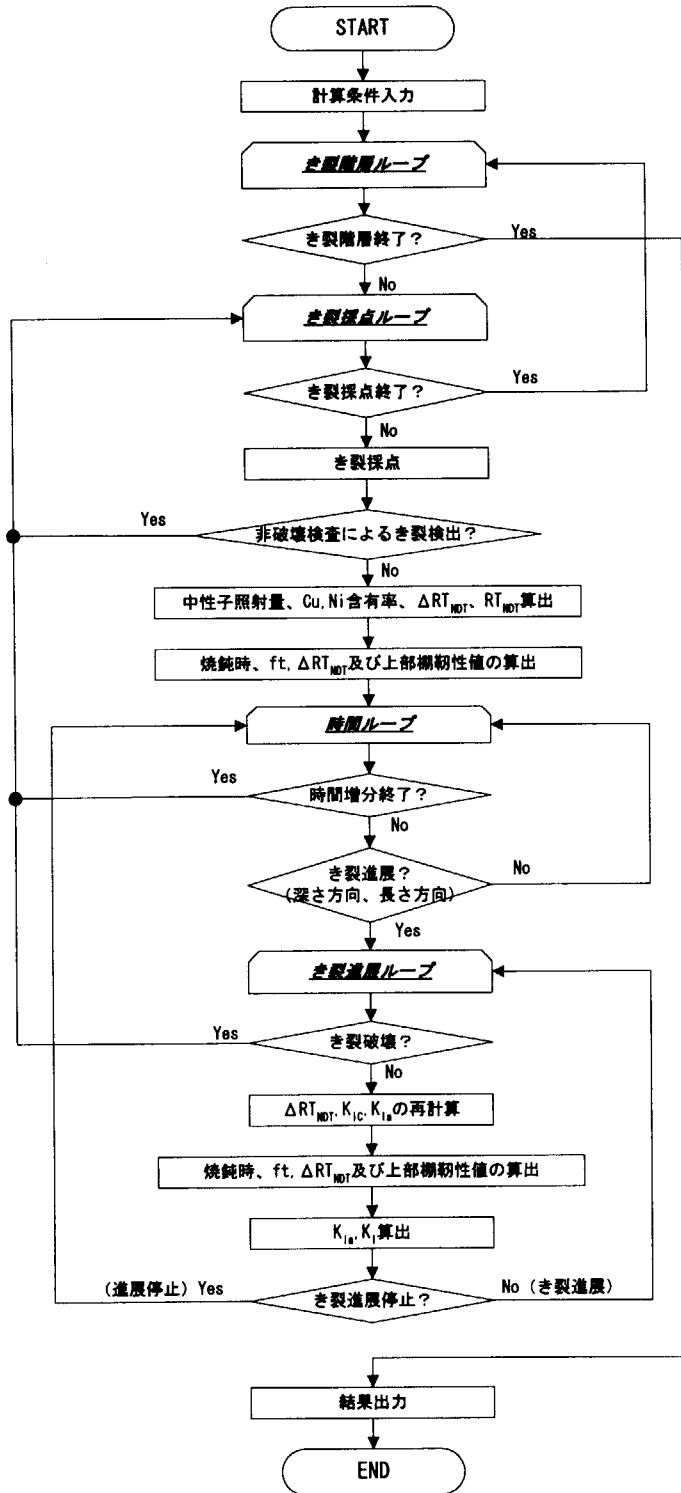


図 A1.3 半楕円き裂解析のフロー図



(4) き裂の進展・停止判定フロー図

き裂の進展判定フローを図 A1.4 に、き裂進展停止判定フローを図 A1.5 に示す。

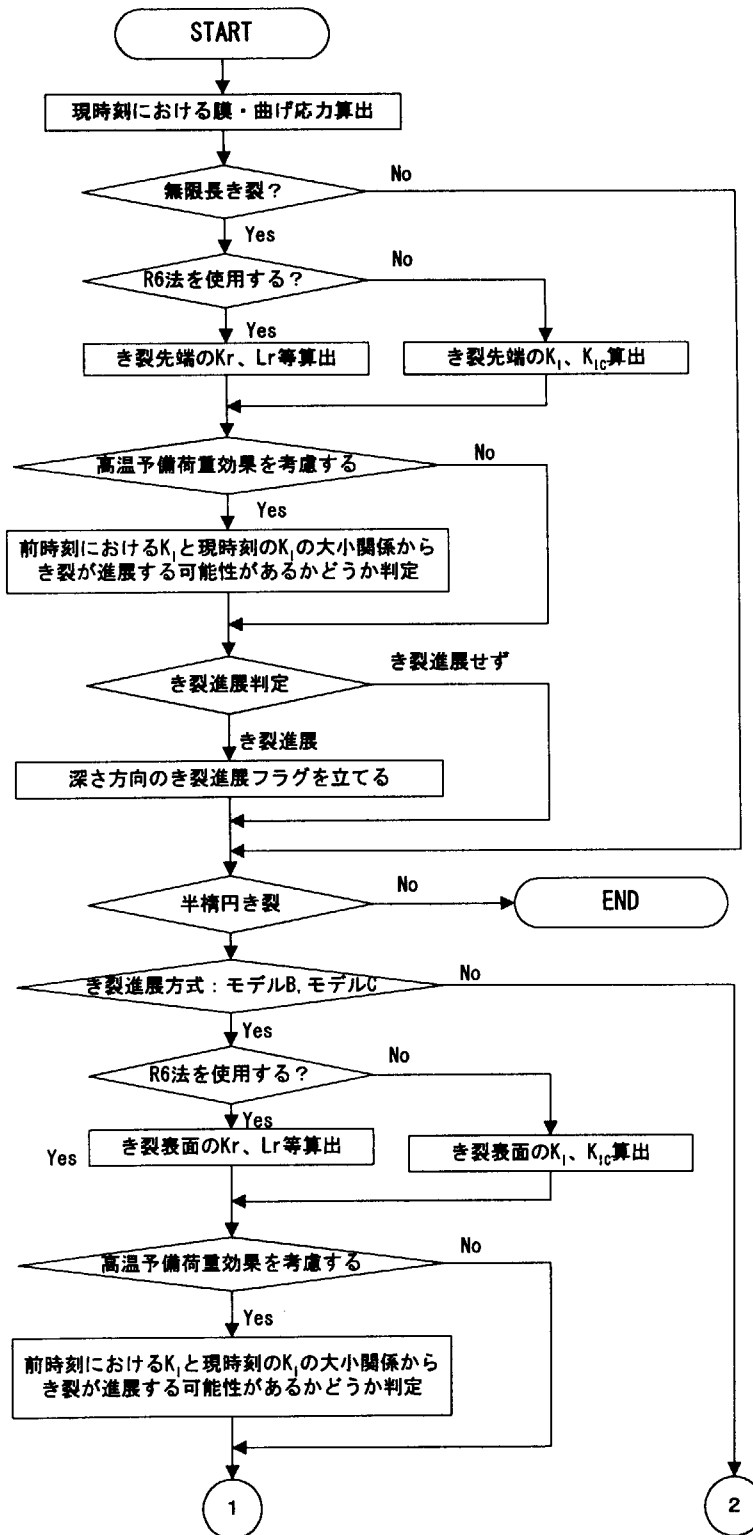


図 A1.4 き裂の進展判定フロー図 その1

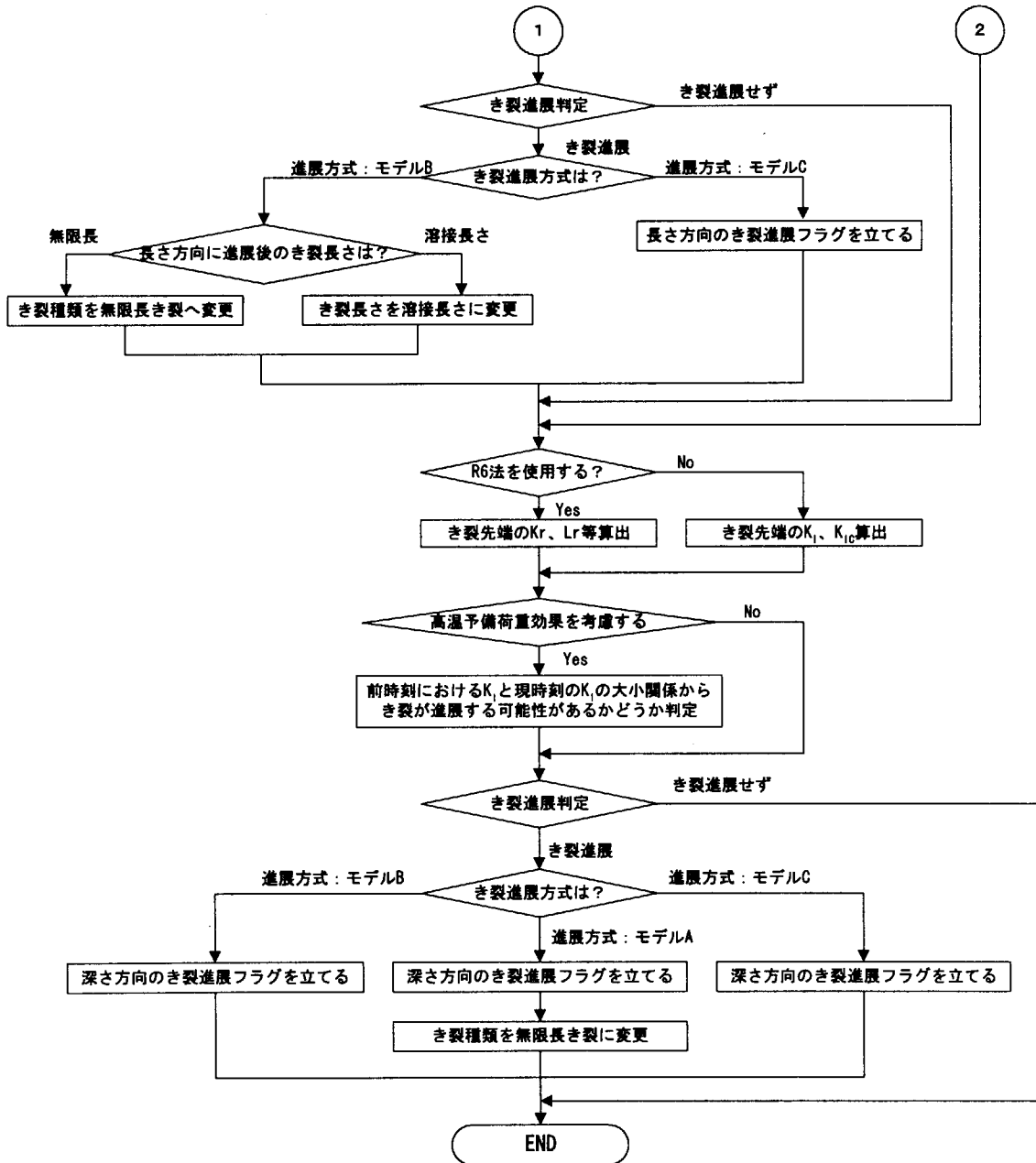


図 A1.4 き裂の進展判定フロー図 その2

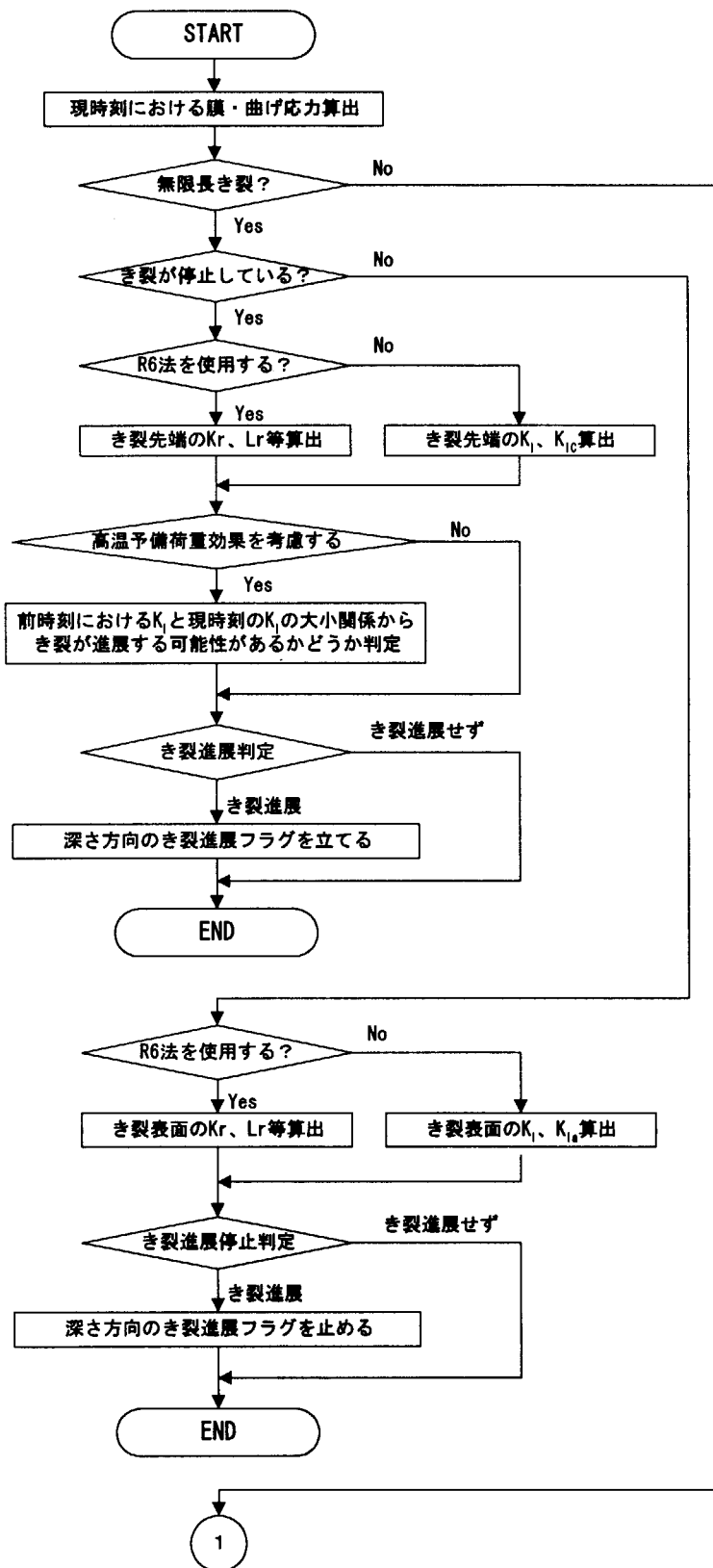


図 A1.5 き裂進展停止判定フロー図 その1

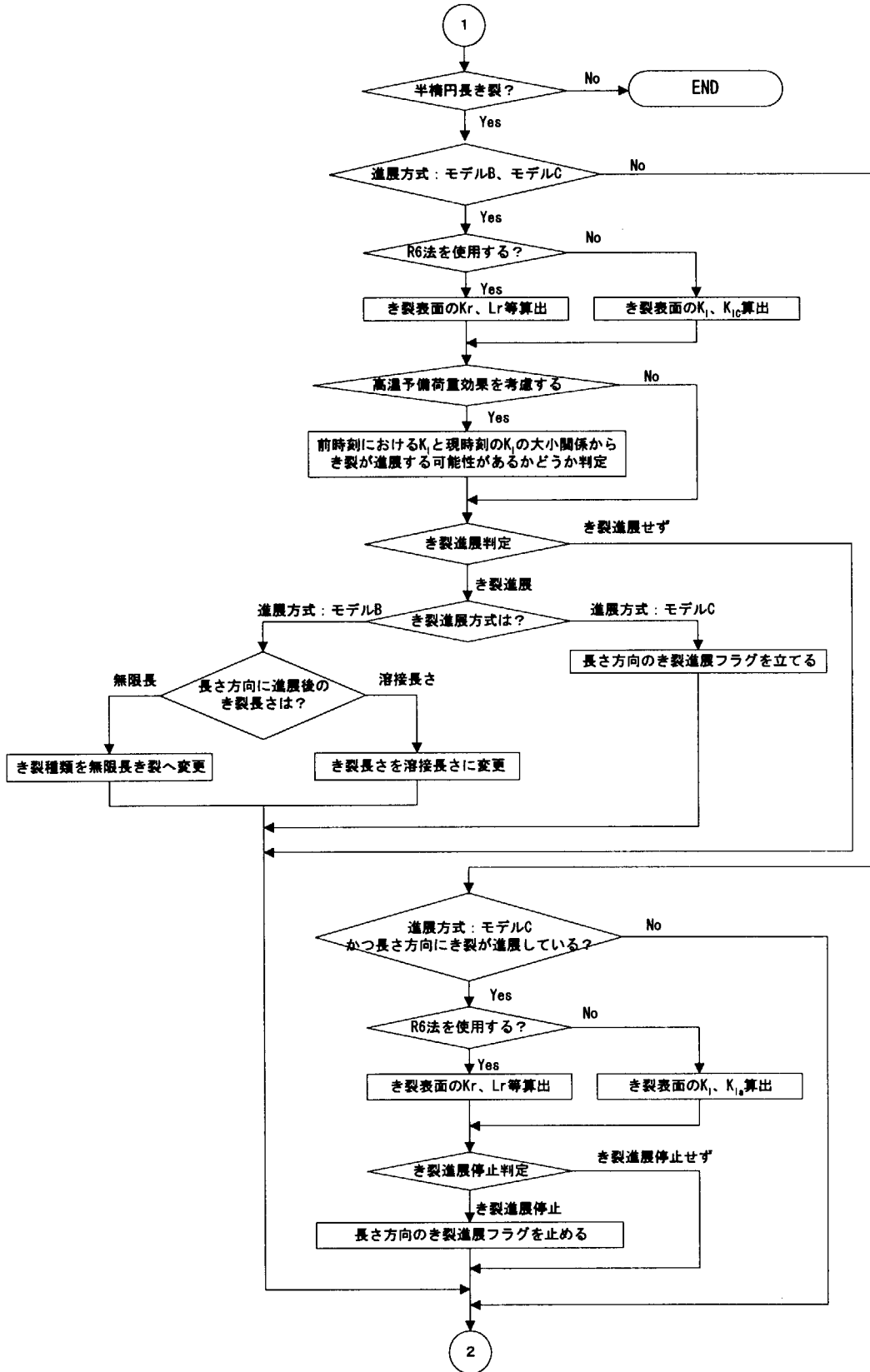


図 A1.5 き裂進展停止判定フロー図 その2

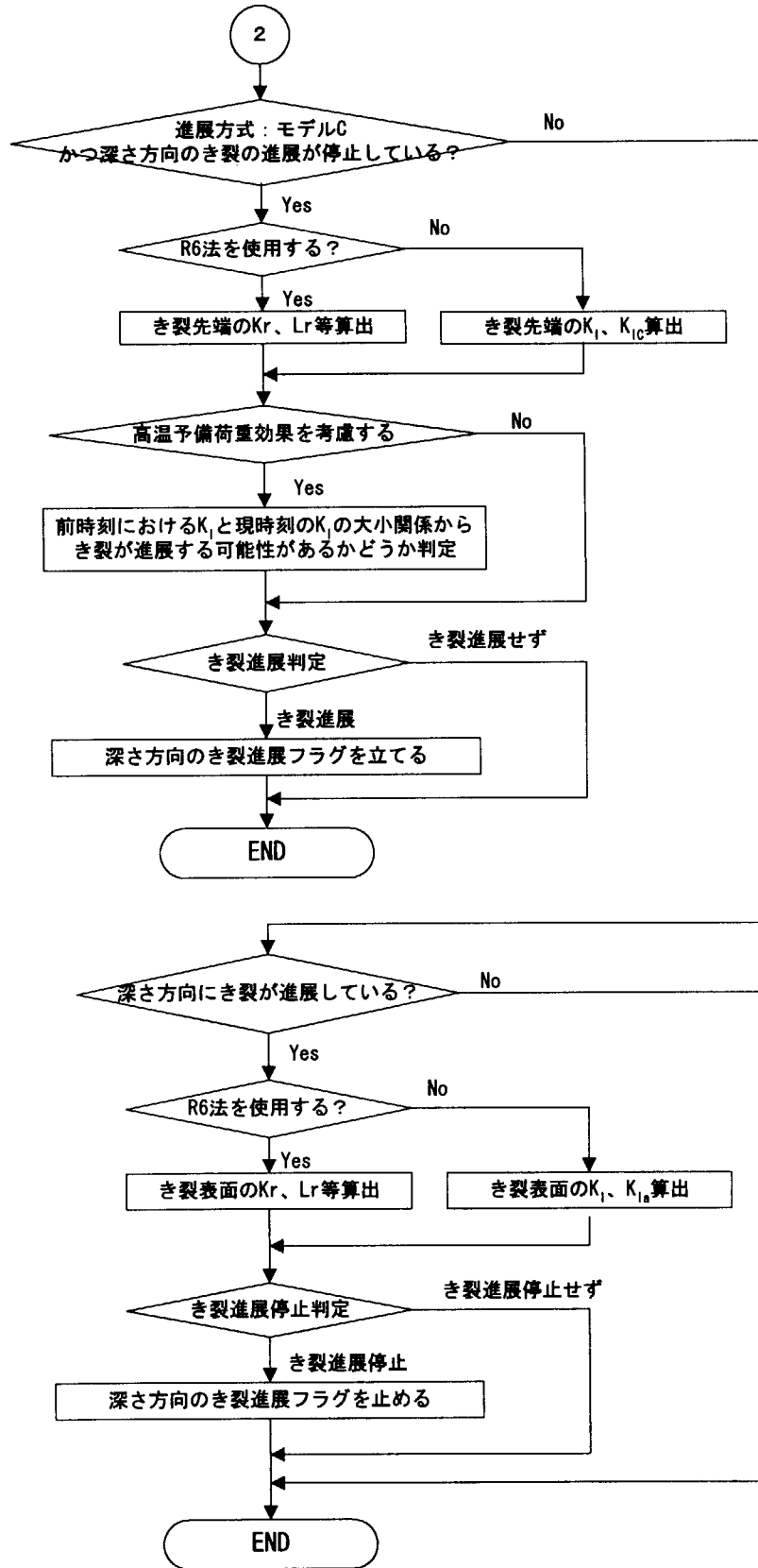


図 A1.5 き裂進展停止判定フロー図 その3

(5) R6法のフロー図

R6法のフローを図A1.6に示す。

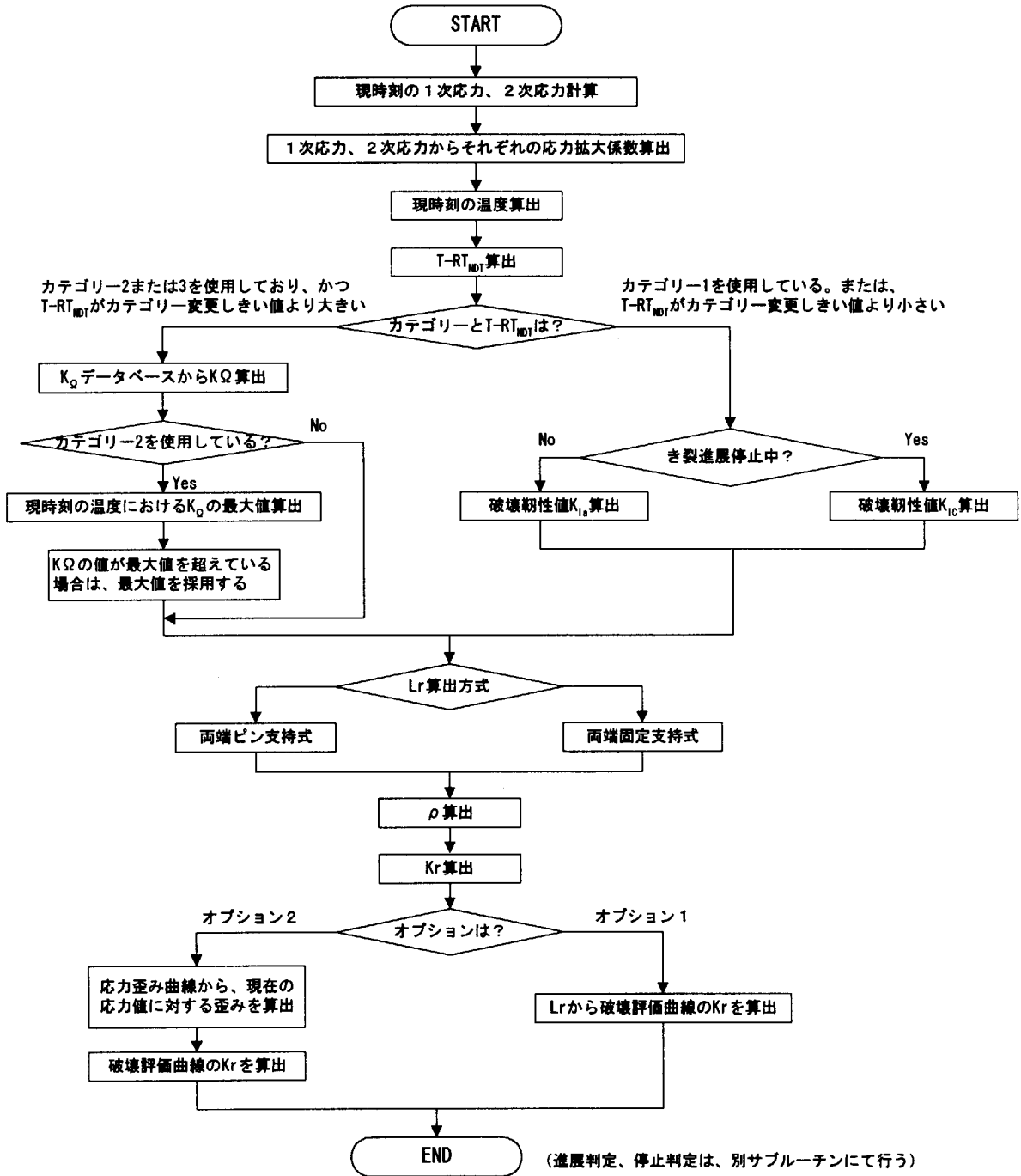


図 A1.6 R6法のフロー図

## 付録 2 基礎理論及び解析手法の解説

This is a blank page.



## 付録2 目次

- A2 基礎理論及び解析手法
  - A2.1 確率計算法
    - A2.1.1 通常のモンテカルロ法
    - A2.1.2 重み付きモンテカルロ法
    - A2.1.3 階層別モンテカルロ法
  - A2.2 初期き裂深さ分布
    - A2.2.1 指数分布 (Marshall 分布)
    - A2.2.2. OCTAVIA 分布
    - A2.2.3 き裂深さの不連続採点
    - A2.2.4 き裂深さの連続採点
  - A2.3 き裂アスペクト比の分布
    - A2.3.1 指数分布モデル
    - A2.3.2 対数正規分布
  - A2.4 温度及び応力分布の時刻歴
  - A2.5 無限長き裂の応力拡大係数
    - A2.5.1 VISA の4次多項式応力分布に対する応力拡大係数
    - A2.5.2 膜・曲げ応力分布に対する応力拡大係数
    - A2.5.3 PASCAL における3次多項式応力分布に対する応力拡大係数開発式
    - A2.5.4 影響関数法
  - A2.6 半楕円き裂の応力拡大係数
    - A2.6.1 Newman-Raju の応力拡大係数
    - A2.6.2 白鳥の応力拡大係数
    - A2.6.3 VISA-II の応力拡大係数
    - A2.6.4 関東の式
    - A2.6.5 JEAC4206 の式
  - A2.7 クラッドによる熱応力を考慮する場合の応力拡大係数
    - A2.7.1 簡易法
    - A2.7.2 影響関数法
    - A2.7.3 影響関数式から3次多項式応力分布による応力拡大係数への切替え機能
  - A2.8 容器内壁フルエンス減衰評価方式
  - A2.9 半楕円き裂進展の評価方式
  - A2.10 破壊靱性の評価式
    - A2.10.1 NRC 平均曲線
    - A2.10.2 ASME Sect.XI の下限曲線
    - A2.10.3 ORNL の平均曲線
    - A2.10.4 JEAC4206 の国内式

- A2.11 脆化予測式
  - A2.11.1 JEAC4206 の国内予測式
  - A2.11.2 米国 Regulatory Guide 1.99(Rev.2)式
- A2.12 偏差再計算法
- A2.13 破壊クライテリア
  - A2.13.1 KIC, K<sub>Ia</sub> 基準
  - A2.13.2 塑性崩壊基準
  - A2.13.3 R6 法(Rev.3)
- A2.14 R6 法の解析手順
  - A2.14.1 R6 法のオプションと解析カテゴリー
  - A2.14.2 L<sub>r</sub> の解析手法
  - A2.14.3 K<sub>r</sub> の評価方式
  - A2.14.4 R6 法カテゴリー 3 解析に対する標準 J-R 曲線の設定と解析標準化
  - A2.14.5 カテゴリー 1 と カテゴリー 2 の切り替えについて
- A2.15 き裂進展刻みの計算方法
- A2.16 非破壊検査
  - A2.16.1 VISA-II モデル
  - A2.16.2 体積検査の PISC モデル及び改良 PISC モデル
  - A2.16.3 LLNL のモデル
  - A2.16.4 荒川のモデル
- A2.17 中性子照射による上部靱性値の低下
- A2.18 焼鈍及び再脆化
  - A2.18.1  $\Delta RTNDT$  に対する回復効果
  - A2.18.2 上部靱性値に対する回復効果
- A2.19 自動調整階層別モンテカルロ法
  - A2.19.1 き裂採点数の最適化
  - A2.19.2 き裂平面階層分割の最適化
- A2.20 逐次膜・曲げ応力変換手法
  - A2.20.1 全断面逐次膜・曲げ応力変換手法
  - A2.20.2 部分断面逐次膜・曲げ応力変換手法 (改良手法)
  - A2.20.3 応力拡大係数と適用可能な応力分布
- A2.21 残留応力の考慮
- A2.22 高温予荷重効果
- A2.23 主な確率変数
- A2.24 KIC と K<sub>Ia</sub> の相関の考慮
- A2.25 感度解析用連続計算機能
- A2.26 決定論的解析機能

## A2 基礎理論及び解析手法

以下では、コードで採用している基礎理論、基礎手法及び主な評価式について記述する。その主な項目を以下に示す。

- ・ 確率計算手法
- ・ 初期き裂深さ分布
- ・ 初期き裂アスペクト比の分布
- ・ 温度及び応力分布の時刻歴
- ・ 無限長き裂の応力拡大係数
- ・ 半楕円き裂の応力拡大係数
- ・ クラッドがある場合の応力拡大係数
- ・ 容器壁内フルエンス減衰評価方式
- ・ 半楕円き裂進展の評価方式
- ・ 破壊靱性値の評価式
- ・ 脆化予測式
- ・ 偏差再計算手法
- ・ 破壊クライテリア
- ・ R6 法
- ・ き裂進展刻みの計算方式
- ・ 非破壊検査
- ・ 中性子照射による上部靱性値の低下
- ・ 焼鈍および再脆化
- ・ 自動調整層別モンテカルロ法
- ・ 逐次膜・曲げ応力変換手法
- ・ 残留応力の考慮
- ・ 高温予荷重効果
- ・ 主な確率変数
- ・  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  の相関の考慮
- ・ 感度解析用連続計算機能
- ・ 決定論的解析機能

### A2.1 確率計算手法

確率論的数値計算手法には数値積分手法とモンテカルロ手法がある。複雑な問題になると、数値積分手法の適用は困難となる場合が多く、モンテカルロ手法は有効である。通常のモンテカルロ法は確率の非常に低い問題に対して、精度良く解析するために莫大なサンプル数を用いなければならぬので計算時間はしばしば問題となる。そのため、高速化モンテカルロ法としては、重み付きモンテカルロ法や階層別モンテカルロ法は良く用いられている。

### A2.1.1 通常のモンテカルロ法

通常のモンテカルロ法<sup>1)</sup>ではランダムな乱数を発生することによって確率密度関数からサンプルを設定する。次に、これらのサンプルを用いて決定論的な解析を行う。 $N$ 回の試行を行ってそのうち $N_f$ 回は破損が生じたら、破損確率は次のように得られる。

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (2.1.1)$$

### A2.1.2 重み付きモンテカルロ法

発生確率が極めて小さい事象を通常のモンテカルロ法で解析する場合には、膨大な数の試行が必要となる。より少ない試行数で正しい確率を求める高速化手法には重み付きモンテカルロ法<sup>2)</sup>がある。

いま、問題とする確率変数を $x$ とし、この確率変数の確率密度関数を $f(x)$ とする。

このとき、 $x$ がある値 $c$ より大きくなる確率は次のように計算される。

$$P(x > c) = \int_c^{\infty} f(x) dx \quad (2.1.2)$$

ここで、 $I_c(x)$ という関数を次式のように定義する。

$$I_c(x) = \begin{cases} 1 & (x > c) \\ 0 & (x \leq c) \end{cases} \quad (2.1.3)$$

この関数を用いると式(2.1.2)は次のようになる。

$$P(x > c) = \int_{-\infty}^{\infty} I_c(x) f(x) dx \quad (2.1.4)$$

ここで、次式を満足する関数 $g(x)$ を導入する。

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx = 1 \quad (2.1.5)$$

$g(x)$ は式(2.1.5)を満足するので、ある確率密度関数であると考えることができる。この関数を用いると式(2.1.4)は次のように書くことができる。

$$P(x > c) = \int_{-\infty}^{\infty} I'_c(x) g(x) dx \quad (2.1.6)$$

ただし

$$I'_c(x) = \begin{cases} \frac{f(x)}{g(x)} & (x > c) \\ 0 & (x \leq c) \end{cases} \quad (2.1.7)$$

である。

通常のモンテカルロ法では、式(2.1.3)を用いて確率を次式のように計算する。

$$P(x > c) = \frac{\sum_{i=1}^N I_c(x_i)}{N} \quad (2.1.8)$$

ここで、 $N$ は、試行の数であり、 $x_i$ は、試行ごとに $f(x)$ に従ったランダムな値をとる。これに対して、重み付きモンテカルロ法の場合は次式で確率を計算する。

$$P(x > c) = \frac{\sum_{i=1}^N I'_c(x_i)}{N} \quad (2.1.9)$$

重み付きモンテカルロ法は次のように要約できる。密度関数  $f(x)$  からサンプルを発生する場合（通常のモンテカルロ法）はある程度の数の  $N_f$  を確保するために、計算回数を十分に多くなければならず、計算時間もかかりすぎる。そこで、破壊領域に近づいた位置の別の確率密度関数  $g(x)$  を考えて、この  $g(x)$  からサンプルを発生させる。こうすることによって、少ないサンプル数である程度数の  $N_f$  を確保できる。

### A2.1.3 階層別モンテカルロ法

階層別モンテカルロ法<sup>3)</sup>は重み付きモンテカルロ法と同様、高速化モンテカルロ法の1つである。発生確率が極めて小さい事象に対しても有効である。本解析コードでは、半楕円き裂についてこの手法を用いている。

本コードでは、半楕円き裂寸法のサンプルの採点は、き裂の深さ  $a$  と容器壁肉厚  $t$  との比  $a/t$ 、及びアスペクト比  $\beta = b/a$  ( $b$  はき裂の半長)によって定義したき裂サイズ平面において行われている。このき裂サイズ平面は図 A2.1.1 に示す通りである。全ての初期き裂の寸法はこのき裂平面に含まれていると考えられる。

通常のモンテカルロ法でこのき裂平面からサンプルを採点するとき、全平面にわたりき裂寸法をランダムに決定し、式(2.1.1)を用いて破損したサンプル数と全サンプル数との比から破損確率を計算するが、階層別モンテカルロ法ではこのき裂サイズ平面に対して、まず図 A2.2.2 に示すようにいくつかの階層に分割する。そして、き裂寸法に関する採点は全階層からくまなく採取されるように、強制的に各階層でのサンプル数を設定する。さらに、各サンプルには初期き裂サイズ分布に従って重み付きを行う。

つまり、初期き裂寸法の確率密度を  $p(a/b, a/t)$  とすると、第  $m$  番目の階層 ( $x_1 < a/b < x_2, y_1 < a/t < y_2$ ) から採取される確率  $p_m$  は

$$p_m = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} p(x, y) dx dy \quad (2.1.10)$$

と表される。この確率  $p_m$  が  $m$  番目の階層から採取されたサンプルの重みとなる。

このような重み付きをしたサンプリングを行うと破損確率は以下のように計算される。第  $m$  番目の階層から採取するサンプル数を  $N_m$ 、そのうち破損した数を  $N_{mf}$  とすると、破損確率は  $P_f$  は次のようになる。

$$P_f = \sum_{m=1}^M p_m \frac{N_{mf}}{N_m} \quad (2.1.11)$$

ここで  $M$  は総階層数である。

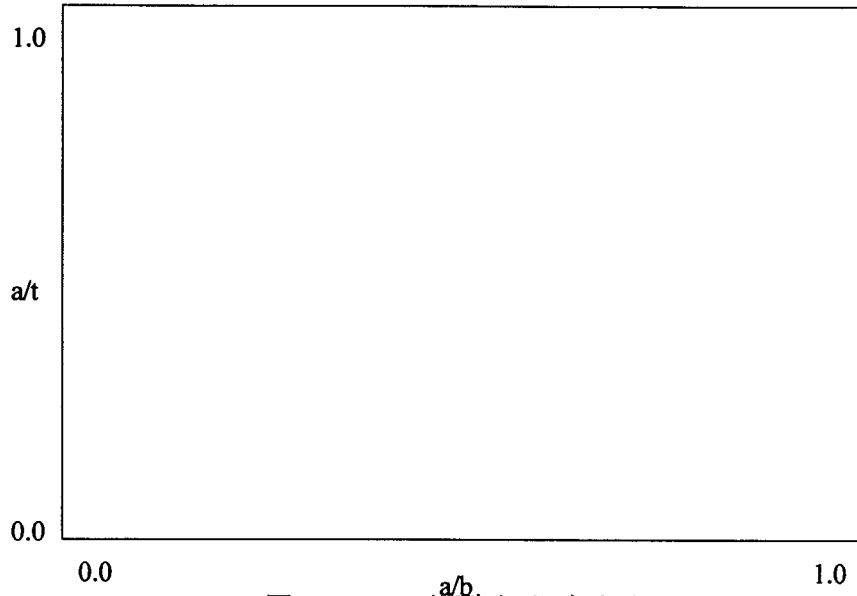


図 A2.1.1 き裂サイズ平面

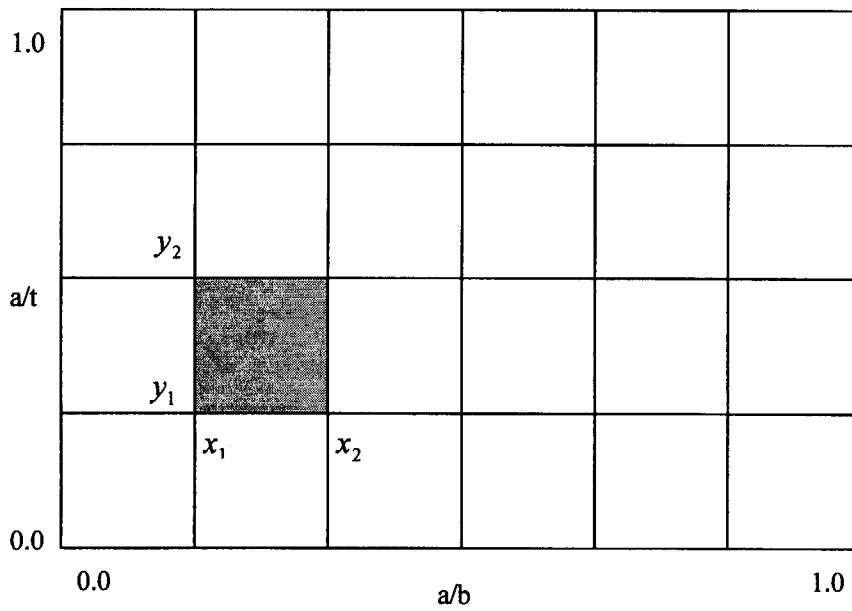


図 A2.1.2 階層別モンテカルロ法

## A2.2 初期き裂深さ分布

本解析コードでは、主に以下の2種類のき裂を解析対象としている。

- ・表面無限長き裂
- ・表面半楕円き裂

また、表面半楕円き裂としても以下の4種類のき裂モデルを考慮することができる。

- ・初期寸法固定
- ・深さに分布を持つが、アスペクト一定モデル
- ・深さに分布を持つが、長さ一定モデル
- ・深さとアスペクト比がともに分布を持つモデル

本解析コードで主に表面き裂を評価対象としているのは過渡事象中の圧力および温度変化によって生じる応力は外表面に比べ、内表面において遥かに大きく、压力容器内表面の照射脆化は特に厳しいなどのことを考慮したためである。

初期き裂深さの分布モデルとして、PSACAL では主に指数分布 (Marshall 分布)、OCTAVIA 分布、ユーザ入力分布を考慮することができる。また、き裂の採点方式として、不連続区間採点方式と連続採点方式を考慮することができる。

### A2.2.1 指数分布 (Marshall 分布)

初期き裂深さ方向の指数分布<sup>4)</sup>の確率密度関数は、次式のように表される。

$$p(a) = \lambda \exp(-\lambda a) \quad (2.2.1)$$

ここで、 $\lambda$  は指数分布の指数である。Marshall 分布の場合は  $\lambda = 0.16 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$  である。

深さ  $a$  より深いき裂が存在する確率を求めるならば、式(2.2.1)を  $a$  から無限大まで積分すればよい。その結果、次式が得られる。

$$P(> a) = \int_a^{\infty} p(x) dx = e^{-\lambda a} \quad (2.2.2)$$

また、区間  $a_1$  から  $a_2$  までの間にき裂が存在する確率は、以下のように計算される。

$$P(a_2 > a > a_1) = e^{-\lambda a_2} - e^{-\lambda a_1} \quad (2.2.3)$$

### A2.2.2 OCTAVIA 分布

OCTAVIA 分布<sup>4)</sup>の密度関数を表 A2.2.1 に示す。Marshall 分布と OCTAVIA 分布の比較を図 A2.2.1 に示す。

### A2.2.3 き裂深さの不連続採点

き裂深さの決定方法を図 A2.2.2 に示す。まず、ある一様乱数  $r$  を発生しておく。そして、これに対応したき裂深さ累積確率からき裂の深さを決定する。不連続区間分布を用いた場合は、不連続区間の中において線形補間の方法でき裂深さを決定した。このように決定したき裂深さを  $a_2$ 、 $a_3$  (OCA-P の採点方式) で表す。

表 A2.2.1 き裂深さの OCTAVIA 分布モデル THICK : 肉厚深さ

区間開始き裂深さ(in)	区間終了き裂深さ(in)	き裂存在確率
0.0	0.0625	0.597225
0.0625	0.1875	0.250000
0.1875	0.3750	0.125000
0.3750	0.7500	0.025000
0.7500	1.2500	0.002200
1.2500	1.7500	0.000425
1.7500	2.2500	0.000100
2.2500	2.7500	0.000030
2.7500	3.2500	0.000015
3.2500	THICK	0.000005

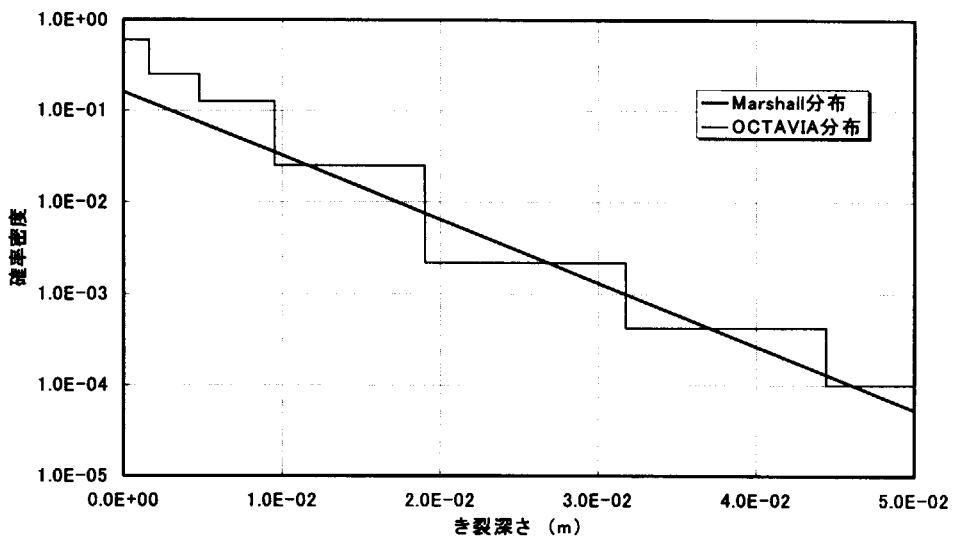


図 A2.2.1 Marshall 分布と OCTAVIA 分布

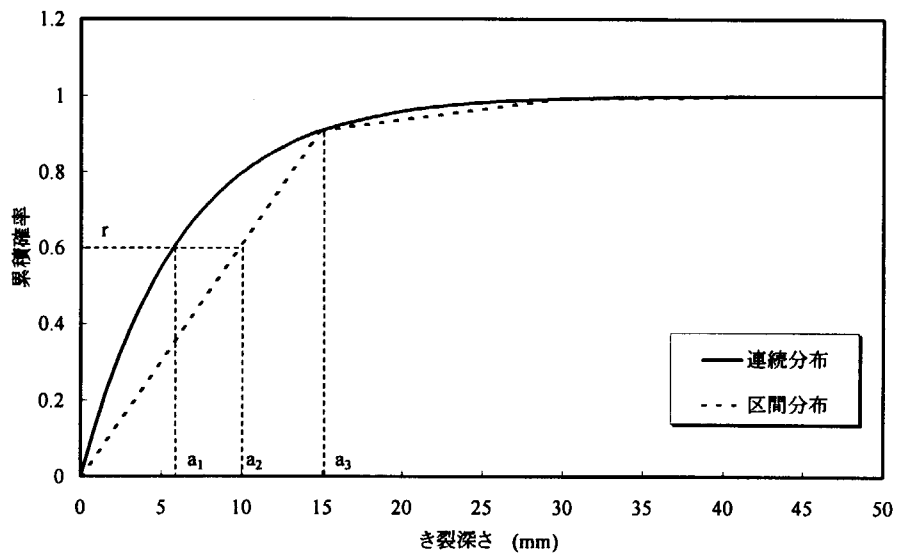


図 A2.2.2 初期き裂寸法の決定方法及びそれに対応した初期き裂寸法



#### A2.2.4 き裂深さの連続採点

指数分布について、不連続な区間分布を用いて定義した累積確率は連続な分布関数で定義した累積確率と一致しないため、設定された初期き裂寸法は一定の誤差が含まれている。これに対して、き裂深さの連続採点方式を用いることによって、破損確率解析精度の向上を図ることができる。

初期き裂深さ分布が指数分布の場合の確率密度関数は次式で与えられる。

$$p = \lambda e^{-\lambda a} \quad (2.2.4)$$

ここで、 $a$  はき裂深さ、 $\lambda$  は係数であり、Marshall 分布の場合は 0.16 である。き裂深さ 0 から  $a$  までの累積確率密度は、上式を 0 から  $a$  まで積分することによって評価できる。

$$p(a) = \int_0^a \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - e^{-\lambda a} \quad (2.2.5)$$

初期き裂深さを採点する場合は、まず 0~1 までの一様な乱数  $r$  を発生させ、上記積分式の値  $p(a)$  が  $r$  になるような  $a$  を求めれば良い。 $a$  は次式から算出される。

$$\begin{aligned} r &= 1 - e^{-\lambda a} \\ a &= -\frac{1}{\lambda} \ln(1-r) \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

ただし、得られた  $a$  が重み付きモンテカルロ法のスレシヨルド値よりも小さい場合はその値を棄却し、新たに乱数を発生させて再度  $a$  を算出する。

#### A2.3 き裂アスペクト比の分布

初期き裂のアスペクト比に関しては、指数分布、対数正規分布及びユーザ入力分布を考慮することができる。

##### A2.3.1 指数分布モデル

アスペクト比の指数分布<sup>3)</sup>は以下のように表される。

$$P(\beta) = \lambda_b \exp[-\lambda_b(\beta-1)] \quad (2.3.1)$$

ただし、

$\lambda_b$	: 指数分布の係数
$\beta = b/a$	: アスペクト比
$b$	: き裂長さの半分
$a$	: き裂の深さ

である。

##### A2.3.2 対数正規分布

アスペクト比の対数正規分布<sup>3)</sup>は以下のように表される。

$$P(\beta) = \frac{C}{\sigma\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\beta/\mu)}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.3.2)$$

ただし、式中の各パラメータは  $\beta > 5$  のき裂の存在確率  $\rho$  によって決定される。LLNL 研究所は以下の 2 組のデータを与えている。

$\rho$	$10^{-2}$	$10^{-4}$
$\sigma$	0.538	0.383
$\mu$	1.336	1.158
C	1.142	1.541

$\rho$  が同じである場合の指数分布と対数正規分布の比較を図 A2.3.1 に示す。

以上の分布モデルのうち、対数正規分布は良く用いられている。また、その中のパラメータについては、 $\rho = 10^{-2}$  のデータは LLNL 研究所に推奨されている<sup>3)</sup>。このことはアスペクト比が 5 よりも大きい初期き裂の存在確率は 0.01 とみなした方が妥当であることを意味している。

式 (2.3.2) の C は、 $\sigma$  と  $\mu$  から次式を用いて算出することができる。

$$C = \frac{2}{\text{erfc}\left(\ln \frac{1}{\mu} / \sigma 2^{1/2}\right)} \quad (2.3.3)$$

ここで、 $\text{erfc}(x)$  は誤差関数である。アスペクト比が  $\beta$  以上のき裂の存在確率は、式 (2.3.2) を  $\beta$  から無限大まで積分することで得られる。

$$P(> \beta) = \int_{\beta}^{\infty} p(x) dx = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\ln \beta - \ln \mu}{\sigma}\right) C \quad (2.3.4)$$

よって、区間  $\beta_1$  から  $\beta_2$  の間にき裂が存在する確率は、以下のようにになる。

$$P(\beta_2 > \beta > \beta_1) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\ln \beta_2 - \ln \mu}{\sigma}\right) C - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\ln \beta_1 - \ln \mu}{\sigma}\right) C \quad (2.3.5)$$

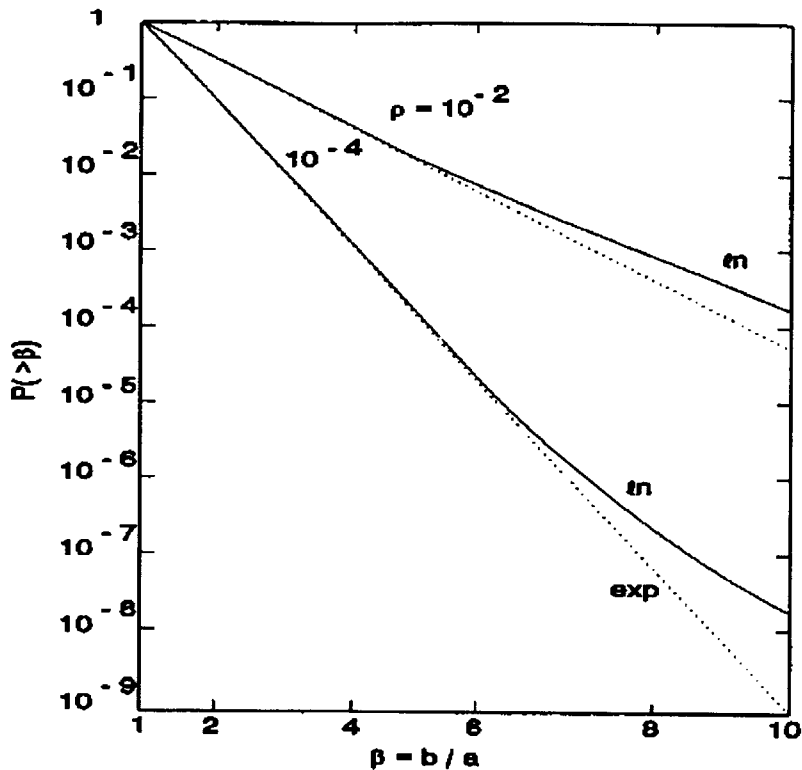


図 A2.3.1 アスペクト比の指数分布と対数正規分布の比較

#### A2.4 温度及び応力分布の時刻歴

PTS 事象は熱及び内圧の過渡状態を伴う事象であり、事象中の水温及び内圧の変化によって、压力容器の肉厚方向において、温度及び応力分布が生じることになる。そのため、確率論的破壊力学手法により压力容器の健全性を評価する際は、压力容器の肉厚方向における温度及び応力分布の時刻歴を評価する必要がある。

本解析コードでは、温度及び応力分布に関する決定論的な解析部分と確率論的破壊力学の解析部分をそれぞれ独立に取り扱っている。温度及び応力分布に関する決定論的な解析部分に関しては別途の入力データ作成プログラムによって行われる。確率論的解析を目的として開発された本解析コードでは、温度に関しては容器壁肉厚方向の位置座標及び時刻に対応したデータテーブルの形で取り扱い、応力に関しては、以下3つの形式の入力データを対応することができる。

##### (1) 膜・曲げ応力

応力分布を膜応力と曲げ応力成分に分離し、それぞれの成分の時刻歴を入力データとして入力する。

##### (2) 3次多項式分布

応力分布を3次多項式として評価し、各係数項の時刻歴を入力データとして入力する。

##### (3) 離散点分布

応力分布を容器壁肉厚方向の位置座標及び時刻に対応したデータテーブルの形で入力する。

#### A2.5 無限長き裂の応力拡大係数

無限長き裂に関する応力拡大係数は主に以下の解を考慮することができる。

- ・ VISA-II の4次多項式応力拡大係数
- ・ 膜・曲げ応力に対応した応力拡大係数
- ・ PASCAL の解
- ・ 影響関数法による解

##### A2.5.1 VISA の4次多項式応力拡大係数

VISA では応力を以下の多項式で評価している。

$$\sigma(\xi) = \sum_{j=1}^5 \sigma_j \xi^{j-1} \quad (2.5.1)$$

ここで、

$\xi$  : 位置座標 ( $x/t$ )

$x$  : 容器内表面からの距離

$t$  : 容器の肉厚

$\sigma_j$  : 応力分布の係数

である。

以上の応力分布に対して、軸方向無限長き裂の応力拡大係数<sup>4)</sup>は次の式で計算される。

$$K_{I(c)} = \sqrt{\pi a} \sum_{j=1}^5 \sigma_j \alpha^{j-1} i(j) \quad (2.5.2)$$

周方向全周き裂の応力拡大係数<sup>4)</sup>は次の式で計算される。

$$K_{I(z)} = \sqrt{\pi a} \sum_{j=1}^5 \sigma_j \alpha^{j-1} i_c(j) \quad (2.5.3)$$

ただし、 $\alpha = a/t$ 、 $a$ はき裂の深さである。また、 $i$ は軸方向無限長き裂の応力拡大係数の補正係数、 $i_c$ は周方向全周き裂の応力拡大係数の補正係数である。これらの補正係数を以下に示す。

軸方向無限長き裂について：

$$\begin{aligned} i(1) &= 1.1220 + 0.9513\alpha - 0.6240\alpha^2 + 8.3306\alpha^3 \\ i(2) &= 0.6825 + 0.3704\alpha - 0.0832\alpha^2 + 2.8251\alpha^3 \\ i(3) &= 0.5255 + 0.2011\alpha + 0.0313\alpha^2 + 1.4250\alpha^3 \\ i(4) &= 0.4414 + 0.1337\alpha + 0.0386\alpha^2 + 0.8806\alpha^3 \\ i(5) &= 0.3863 + 0.0989\alpha + 0.0437\alpha^2 + 0.5951\alpha^3 \end{aligned} \quad (2.5.4)$$

周方向無限長き裂について：

$$\begin{aligned} i_c(1) &= 1.1220 + 0.3989\alpha + 1.5778\alpha^2 + 0.6049\alpha^3 \\ i_c(2) &= 0.6830 + 0.1150\alpha - 0.7556\alpha^2 + 0.1667\alpha^3 \\ i_c(3) &= 0.5260 + 0.1911\alpha + 0.1000\alpha^2 + 0.5802\alpha^3 \\ i_c(4) &= 0.4450 + 0.0783\alpha + 0.0556\alpha^2 + 0.3148\alpha^3 \\ i_c(5) &= 0.3880 + 0.1550\alpha + 0.1333\alpha^2 + 0.3519\alpha^3 \end{aligned} \quad (2.5.5)$$

#### A2.5.2 膜・曲げ応力に対応した VISA の応力拡大係数

2.5.1 節に示す 4 次多項式の VISA 応力拡大係数は膜・曲げ応力に対応した形に変換することができる。これを以下のように書ける。

$$K_I = \sqrt{\pi a} [(\sigma_m + \sigma_f) f(1) - 2\sigma_f a f(2)] \quad (2.5.6)$$

ここで、 $\sigma_m$ 、 $\sigma_f$ はそれぞれ膜応力、曲げ応力であり、 $a$ は深さ方向位置、 $\alpha$ は $a$ と肉厚( $t$ )の比( $a/t$ )である。また、 $f(1)$ 、 $f(2)$ は応力拡大係数の補正係数である。

$f(1)$ 、 $f(2)$ の評価式は以下ようになる。

軸方向き裂について：

$$f(1) = 1.120 + 0.9513\alpha - 0.6240\alpha^2 + 8.3306\alpha^3 \quad (2.5.7)$$

$$f(2) = 0.6825 + 0.3704\alpha - 0.0832\alpha^2 + 2.8251\alpha^3 \quad (2.5.8)$$

周方向き裂について：

$$f(1) = 1.120 + 0.3989\alpha + 1.5778\alpha^2 + 0.6049\alpha^3 \quad (2.5.9)$$

$$f(2) = 0.6830 + 0.1150\alpha + 0.7556\alpha^2 + 0.1667\alpha^3 \quad (2.5.10)$$

### A2.5.3 PASCAL の解

PASCAL は無限長き裂に関しては、独自の応力拡大係数の解も与えている。このなかで、容器壁の肉厚方向における応力分布を式(2.5.11)に示す 3 次多項式で表せるものと仮定している。

$$\sigma(\xi) = A_0 + A_1\xi + A_2\xi^2 + A_3\xi^3 \quad (2.5.11)$$

ただし、 $\xi = x/t$ 、 $x$  は容器内表面までの距離、 $t$  は容器壁肉厚である。

また、応力拡大係数は重ね合わせの原理に基づき、Buchalet ら<sup>5)</sup>の提案を参考に式 (2.5.12) の形で表す。

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left( A_0 F_0 + \frac{2\xi}{\pi} A_1 F_1 + \frac{\xi^2}{2} A_2 F_2 + \frac{4\xi^3}{3\pi} A_3 F_3 \right) \quad (2.5.12)$$

ただし、 $\xi = x/t$ 、 $a$  はき裂の深さ、 $t$  は容器壁肉厚、 $F$  は応力拡大係数の補正係数である。

また、この応力拡大係数はより使用しやすくするためには、 $alt \leq 0.7$  と  $alt > 0.7$  の 2 つの区間で、補正係数をそれぞれ 4 次と 5 次の多項式で与えている。

周方向き裂に関しては、応力拡大係数の補正係数を以下に示す。

$alt \leq 0.7$  の場合は：

$$\begin{aligned} F_0 &= 0.6820\xi^4 - 1.8283\xi^3 + 3.4051\xi^2 + 0.0209\xi + 1.1215 \\ F_1 &= 1.2402\xi^4 - 2.2730\xi^3 + 2.5718\xi^2 - 0.0578\xi + 1.0727 \\ F_2 &= 1.2458\xi^4 - 2.1560\xi^3 + 2.0896\xi^2 - 0.0852\xi + 1.0518 \\ F_3 &= 1.7599\xi^4 - 2.9822\xi^3 + 2.3602\xi^2 - 0.2277\xi + 1.0483 \end{aligned} \quad (2.5.13)$$

$alt > 0.7$  の場合は：

$$\begin{aligned} F_0 &= 4729.3333\xi^5 - 17919.6364\xi^4 + 27100.4530\xi^3 - 20442.3042\xi^2 + 7692.5106\xi - 1153.4967 \\ F_1 &= 2688.0000\xi^5 - 10106.3636\xi^4 + 15174.8303\xi^3 - 11369.3741\xi^2 + 4250.9351\xi - 633.0513 \\ F_2 &= 2828.0000\xi^5 - 10694.7000\xi^4 + 16149.2500\xi^3 - 12166.6400\xi^2 + 4573.2209\xi - 684.7300 \\ F_3 &= 2165.3333\xi^5 - 8157.7576\xi^4 + 12274.3576\xi^3 - 9215.6389\xi^2 + 3452.5589\xi - 515.0376 \end{aligned} \quad (2.5.14)$$

軸方向き裂に関しては、応力拡大係数の補正係数を以下に示す。

$alt \leq 0.7$  の場合は：

$$\begin{aligned} F_0 &= 10.7049\xi^4 - 8.2048\xi^3 + 7.0153\xi^2 - 0.0633\xi + 1.1215 \\ F_1 &= 5.5223\xi^4 - 4.3919\xi^3 + 4.1432\xi^2 - 0.0374\xi + 1.0718 \\ F_2 &= 4.8360\xi^4 - 4.6927\xi^3 + 3.636\xi^2 - 0.1066\xi + 1.0507 \\ F_3 &= 4.3333\xi^4 - 4.7715\xi^3 + 3.430\xi^2 - 0.1922\xi + 1.0398 \end{aligned} \quad (2.5.15)$$

$alt > 0.7$  の場合は：

$$\begin{aligned} F_0 &= 4089.3333\xi^5 - 16111.6970\xi^4 + 25190.7136\xi^3 - 19541.0041\xi^2 + 7534.7080\xi - 1154.2234 \\ F_1 &= 2258.6667\xi^5 - 8801.8788\xi^4 + 13634.5121\xi^3 - 10492.8353\xi^2 + 4018.3656\xi - 611.3927 \\ F_2 &= 1926.6667\xi^5 - 7428.4242\xi^4 + 11401.2742\xi^3 - 8705.0323\xi^2 + 3310.3981\xi - 500.3917 \\ F_3 &= 1754.6667\xi^5 - 6732.6667\xi^4 + 10291.4668\xi^3 - 7831.4750\xi^2 + 2969.5990\xi - 447.6730 \end{aligned} \quad (2.5.16)$$

この応力拡大係数の適用範囲は  $alt \leq 0.95$  である。

1 例として、3 次応力分布に関する PASCAL の応力拡大係数の補正係数と VISA-II 及び他の解の比

較を図 A2.5.1 と図 A2.5.2 に示す。図 A2.5.1 は軸方向無限長き裂に対する解で、図 A2.5.2 は全周き裂に対する解である。

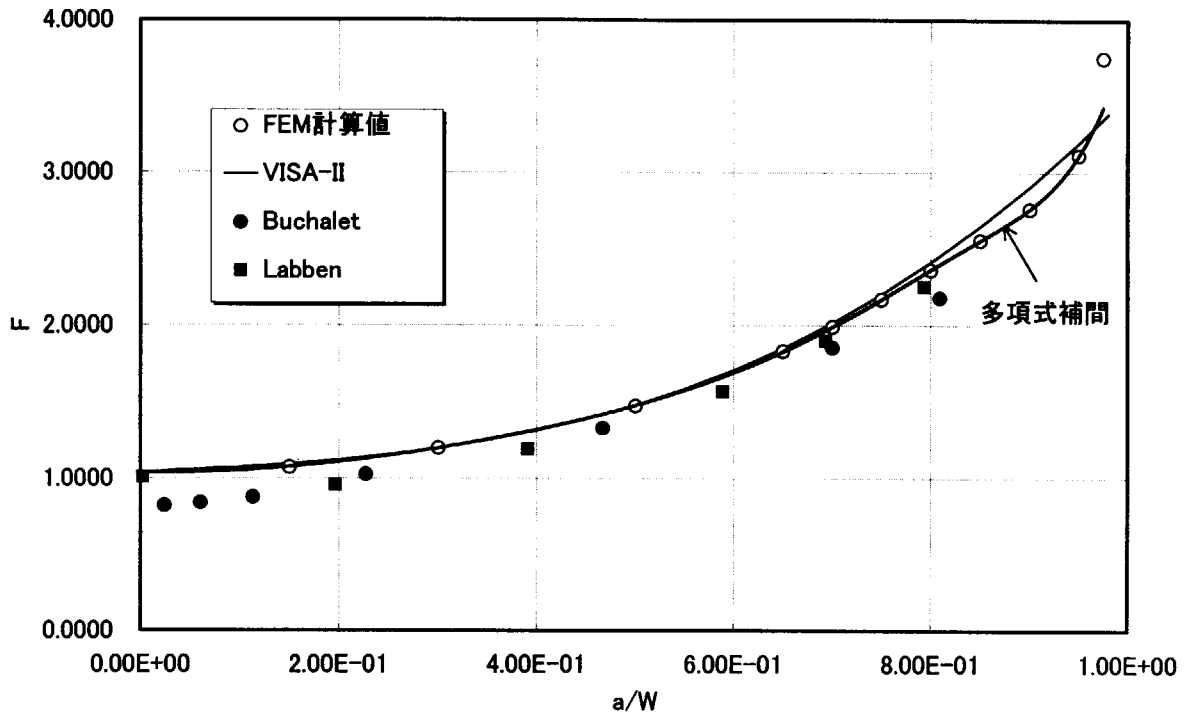


図 A2.5.1 軸方向無限長き裂の応力拡大係数補正係数に関する比較

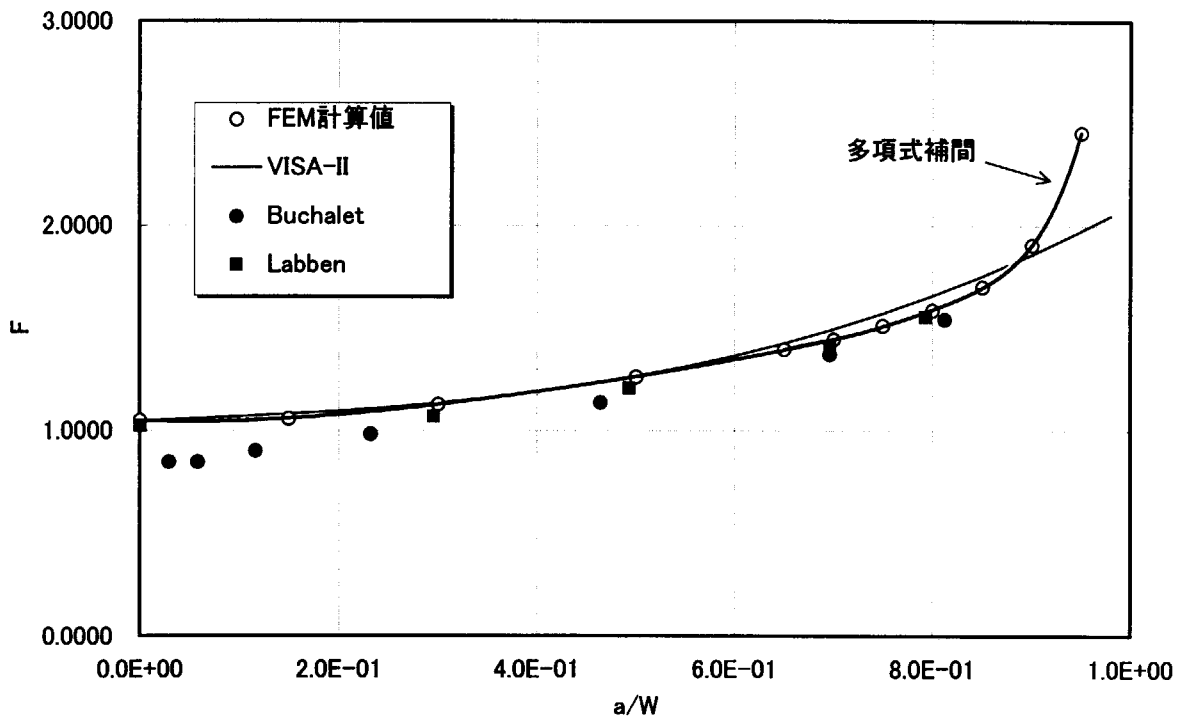


図 A2.5.2 全周き裂の応力拡大係数補正係数に関する比較

**A2.5.4 影響関数法**

影響関数法では単位荷重による応力拡大係数を用いて積分を実施することによって、分布を持った応力による応力拡大係数の計算を行う。

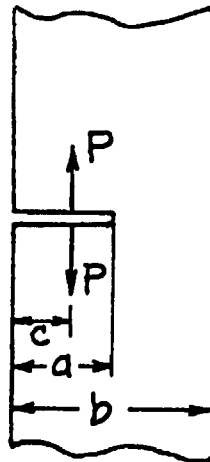
用いた平板の片側き裂の単位荷重による応力拡大係数<sup>6)</sup>を以下に示す。

$$K_I = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{c}{a}, \frac{a}{b}\right) \quad (2.5.17)$$

ただし、

$$F\left(\frac{c}{a}, \frac{a}{b}\right) = \frac{3.52\left(1-\frac{c}{a}\right)}{\left(1-\frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{4.35-5.28\frac{c}{a}}{\left(1-\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{2}}} + \left\{ \frac{1.30-0.30\left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{1-\left(\frac{c}{a}\right)^2}} + 0.83-1.76\frac{c}{a} \right\} \left\{ 1-\left(1-\frac{c}{a}\right)\frac{a}{b} \right\} \quad (2.5.18)$$

また、式中の各変数を図 A2.5.3 に示す。



図A2.5.3 各種パラメータについて

円筒形の圧力容器は平板と仮定しても差し支えない場合は、分布荷重が作用するときの、円筒形容器中の無限長き裂の応力拡大係数は上記単位荷重による応力拡大係数から影響関数法を用いることによって、以下のように算出できる。

$$K_{I(total)} = \int_0^1 \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \sigma(x) F(x) dx \quad (2.5.19)$$

ただし、 $x=c/a$  である。

PASCAL では、式 (2.5.19) に関する積分値を理論積分で計算している。

応力分布が 3 次多項式、各項の係数が全て 1.0 の場合の全周き裂の応力拡大係数の比較を図 A2.5.4 に示す。

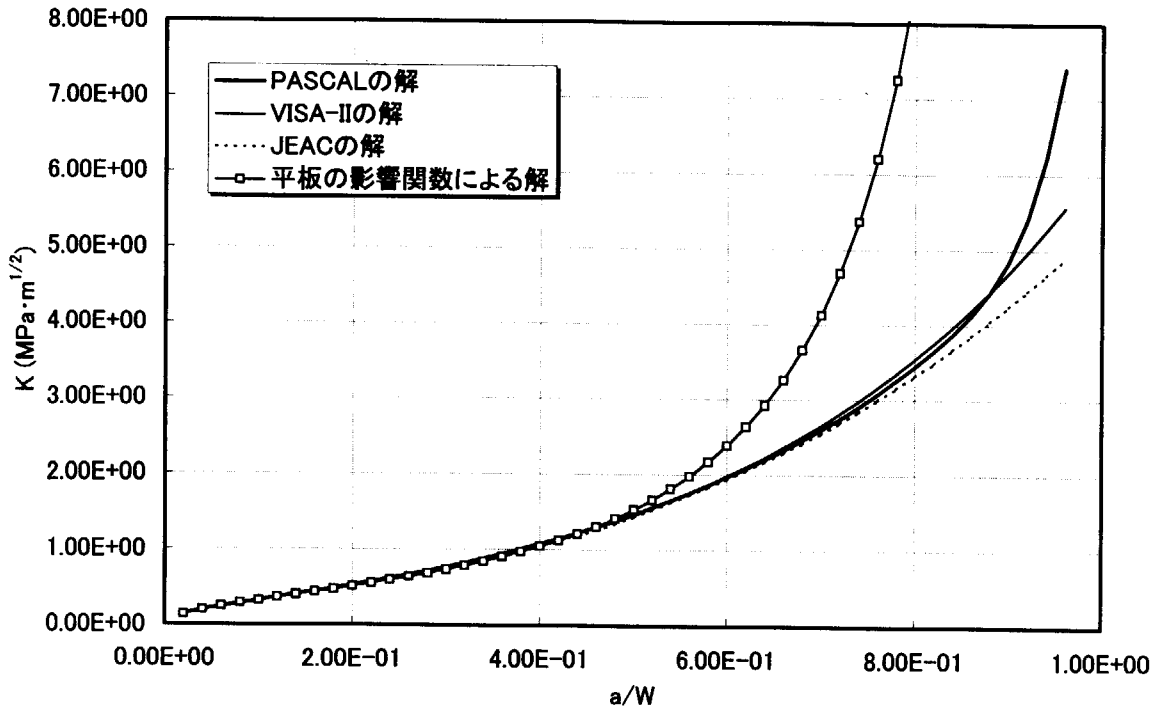


図 A2.5.4 応力拡大係数に関する比較

**A2.6 半楕円き裂の応力拡大係数**

半楕円き裂に関する応力拡大係数の解としては、以下の解を考慮することができる。

- ・膜・曲げ応力に対する Newman-Raju の解
- ・3次応力分布に対する 白鳥の解
- ・VISA-II で用いる 3次応力分布に対する Newman-Raju の解
- ・膜・曲げ応力に対する 関東の式
- ・JEAC4206 で用いる 3次応力分布に対する解 (Buchalet らの解)

**A2.6.1 Newman-Raju の応力拡大係数**

図 A2.6.1 に示す平板中の半楕円表面き裂が膜応力  $\sigma_m$ 、と曲げ応力  $\sigma_b$  を受ける場合の応力拡大係数が Newman と Raju<sup>7)</sup>によって以下のように与えられている。

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\pi a / Q} F \tag{2.6.1}$$

$$F = \{M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4\} g f_\phi f_w$$

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi$$

$$f_w \left\{ \sec \left( \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right\}^{1/2} \tag{2.6.2}$$



このうち、 $a/c < 1.0$  の場合

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/c)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + (a/c)}$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + (a/c)} + 14\{1 - (a/c)\}^{24}$$

$$g = 1 + \{0.1 + 0.35(a/t)^2\}(1 - \sin\phi)^2$$

$$p = 0.2 + (a/c) + 0.6(a/t)$$

$$H_1 = 1 - 0.34(a/t) - 0.11(a/c)(a/t)$$

$$H_2 = 1 + G_{21}(a/t) + G_{22}(a/t)^2$$

$$G_{22} = 0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5}$$

$$f_\phi = \{(a/c)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi\}^{1/4}$$

(2.6.3)

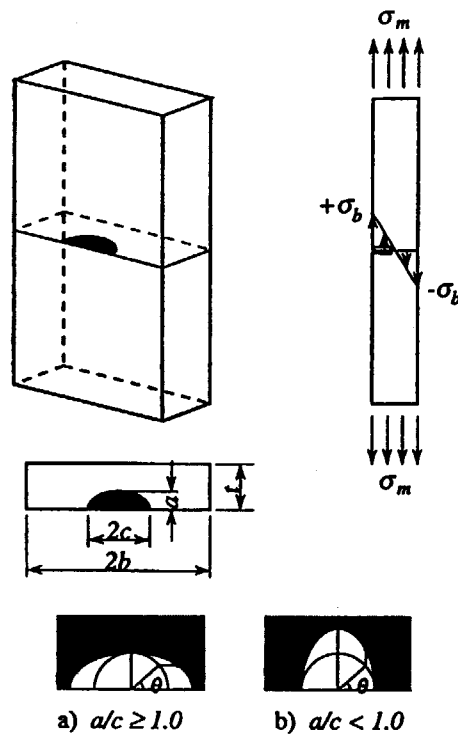


図 A2.6.1 膜応力と曲げ応力を受ける平板中の半楕円き裂

一方、 $a/c \geq 1.0$  の場合

$$Q = 1 + 1.464(c/a)^{1.65}$$

$$\begin{aligned}
M_1 &= \sqrt{(c/a)}\{1+0.04(c/a)\} \\
M_2 &= 0.2(c/a)^4 \\
M_3 &= -0.11(c/a)^4 \\
g &= 1 + \{0.1 + 0.35(c/a)(a/t)^2\}(1 - \sin \phi)^2 \\
p &= 0.2 + (c/a) + 0.6(a/t) \\
H_1 &= 1 + G_{11}(a/t) + G_{12}(a/t)^2 \\
H_2 &= 1 + G_{21}(a/t) + G_{22}(a/t)^2 \\
G_{11} &= -0.04 - 0.41(c/a) \\
G_{12} &= 0.55 - 1.93(c/a)^{0.75} + 1.38(c/a)^{1.5} \\
G_{21} &= -2.11 + 0.77(c/a) \\
G_{22} &= 0.55 - 0.72(c/a)^{0.75} + 0.14(c/a)^{1.5} \\
f_\phi &= \{(c/a)^2 \sin^2 \phi + \cos^2 \phi\}^{1/4}
\end{aligned} \tag{2.6.4}$$

この応力拡大係数の適用範囲は以下に示す通りである。

$$\begin{aligned}
0.2 \leq a/t \leq 0.8 \\
0.2 \leq a/c \leq 2.0
\end{aligned}$$

#### A2.6.2 白鳥の応力拡大係数

白鳥ら<sup>8)</sup>は同じく平板中の半楕円き裂について、3次までの応力分布を考慮した応力拡大係数の数値解析を与えており、次の式で表わせる。

$$\begin{aligned}
K_I^i &= \sum_{i=0}^3 \sigma_i \left\{ A_{00}^i + A_{10}^i \left( \frac{a}{t} \right) + A_{01}^i \left( \frac{a}{c} \right) \right. \\
&\quad + A_{20}^i \left( \frac{a}{t} \right)^2 + A_{11}^i \left( \frac{a}{t} \right) \left( \frac{a}{c} \right) + A_{02}^i \left( \frac{a}{c} \right)^2 \\
&\quad + A_{30}^i \left( \frac{a}{t} \right)^3 + A_{21}^i \left( \frac{a}{t} \right)^2 \left( \frac{a}{c} \right) + A_{12}^i \left( \frac{a}{t} \right) \left( \frac{a}{c} \right)^2 + A_{03}^i \left( \frac{a}{c} \right)^3 \\
&\quad \left. + A_{31}^i \left( \frac{a}{t} \right)^3 \left( \frac{a}{c} \right) + A_{13}^i \left( \frac{a}{t} \right) \left( \frac{a}{c} \right)^3 \right\} \sqrt{\pi \frac{a}{q}} \\
q &= 1 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65}
\end{aligned} \tag{2.6.5}$$

ただし、 $A_{ki}^i$  は定数で、その値を表 A2.6.1 に示す。また肩字  $i$  は図 A2.6.2 に示す応力分布の指数で

ある。i=0 のときは Constant、i=1 のときは Linear、i=2 のときは Quadratic、i=3 のときは Cubic の係数を用いるものとする。

また、き裂先端における本解析コードの座標系と白鳥式の座標系を図 A2.6.3 に示しており、座標系が異なるため、白鳥式を使用する際に座標変換を実施した。

この応力拡大係数の適用範囲は Newman-Raju の応力拡大係数と同じで、以下に示す通りである。

$$0.2 \leq a/t \leq 0.8$$

$$0.2 \leq a/c \leq 2.0$$

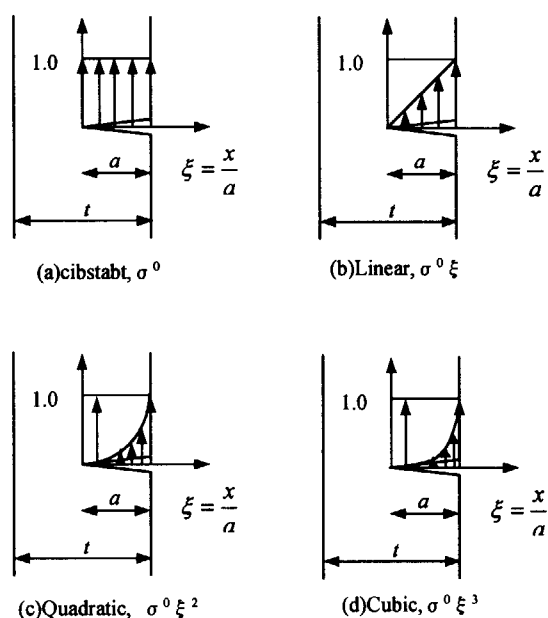
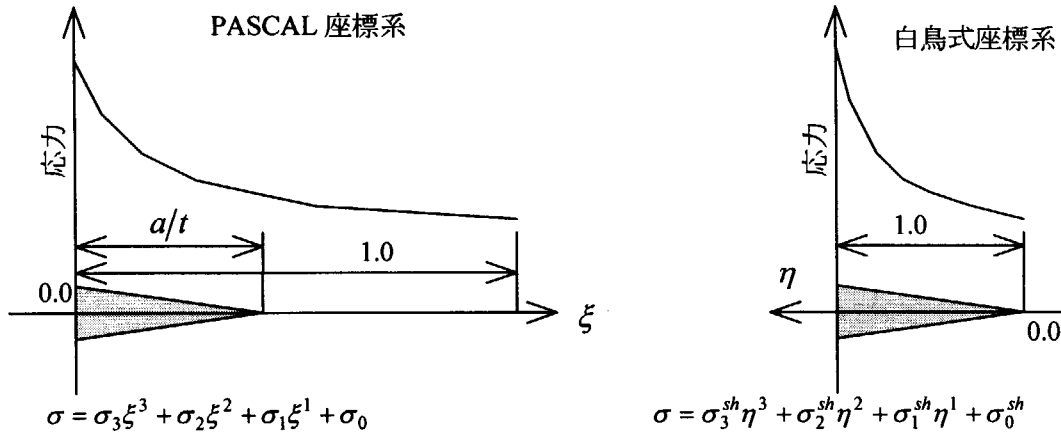


図 A2.6.2 き裂面における応力分布

表 A2.6.1 白鳥の半楕円き裂に対する応力拡大係数式 係数表

k1	i=0 (Constant)		i=1 (Linear)		i=2 (Quadratic)		i=3 (Cubic)	
	き裂先端	き裂表面	き裂先端	き裂表面	き裂先端	き裂表面	き裂先端	き裂表面
00	1.0028E+00	7.9404E-02	4.4911E-01	1.0278E-01	2.9078E-01	1.0779E-01	2.1686E-01	1.0803E-01
10	8.3723E-01	9.4163E-01	3.7926E-01	8.4408E-01	2.4258E-01	7.9601E-01	1.6747E-01	7.4137E-01
01	4.1437E-01	2.2011E+00	3.3606E-02	1.7029E+00	-4.5942E-01	1.3985E+00	-6.7891E-02	1.1965E+00
20	2.6021E+00	-8.1256E-01	1.9134E+00	-9.0911E-01	1.5169E+00	-9.5360E-01	1.2839E+00	-9.0966E-01
11	-4.3013E+00	-1.8095E+00	-2.4693E+00	-1.5820E+00	-1.6875E+00	-1.4425E+00	-1.2682E+00	-1.3410E+00
02	-4.8014E-01	-1.5568E+00	-2.3584E-01	-1.1656E+00	-9.0416E-02	-9.1407E-01	-3.2098E-02	-7.5319E-01
30	-1.9835E+00	1.3967E+00	-1.5094E+00	1.2226E+00	-1.2327E+00	1.1038E+00	-1.0575E+00	9.7184E-01
21	-1.0787E+00	1.5503E+00	-7.8749E-01	1.3872E+00	-5.6039E-01	1.3734E+00	-4.6951E-01	1.3309E+00
12	4.1646E+00	9.9190E-01	2.4380E+00	8.8401E-01	1.6070E+00	7.5704E-01	1.1950E+00	6.7577E-01
03	1.3951E-01	4.1637E-01	7.8721E-02	3.1582E-01	3.3709E-02	2.4875E-01	1.5001E-02	2.0631E-01
31	8.2028E-01	-1.5033E+00	5.9919E-01	-1.2397E+00	4.4638E-01	-1.1419E+00	3.7818E-01	-1.0527E+00
13	-1.1303E+00	-2.5024E-01	-6.6079E-01	-2.3161E-01	-4.2831E-01	-2.0019E-01	-3.1531E-01	-1.8083E-01



図A2.6.3 PASCALにおける3次多項式座標系と白鳥式の座標系

**A2.6.3 VISA-II の応力拡大係数**

VISA-IIでは半楕円き裂の最も深い位置での応力拡大係数<sup>4)</sup>を与えている。ただし、直接に与えられたのは応力拡大係数の補正係数ではなく、式(2.5.2)に示す軸方向無限長き裂の応力拡大係数を半楕円き裂に関する Newman-Raju の応力拡大係数と比較することによって得られた修正係数である。

また、近似式として、この修正係数を周方向半楕円き裂にも適用している。

**A2.6.4 関東の式**

関東<sup>9)</sup>は Newman-Raju<sup>7)</sup>及び三好ら<sup>10)</sup>の半楕円き裂の応力拡大係数の解を利用して、アスペクト比が 0.95 まで使用可能な応力拡大係数算出式を以下に示す。

$$K_I = (\sigma_t + \sigma_b) \sqrt{\pi a / Q} F_1 \tag{2.6.5}$$

$$Q = 1.0 + 1.464(a/c)^{1.65} \tag{2.6.6}$$

$$F_1 = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 G_{ij} \xi^i \left(\frac{a}{c}\right)^j \tag{2.6.7}$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - a/t} \tag{2.6.8}$$

ただし、

- $\sigma_t, \sigma_b$  : 膜応力および曲げ応力
- $a$  : き裂深さ
- $c$  : き裂長さ
- $t$  : 肉厚
- $G_{ij}$  : 表 A2.6.2 に示す係数

である。

また、関東式の有効範囲を表 A2.6.3 に示す。

有効範囲外で Newman-Raju の応力拡大係数の有効範囲に入っている区間については、Newman-Raju の応力拡大係数を使用する。

表 A2.6.2 半楕円き裂に対する関東の応力拡大係数の係数

i	j	膜応力に対して		曲げ応力に対して	
		深さ方向	長さ方向	深さ方向	長さ方向
0	0	0.287026	0.836913	0.473405	0.862347
0	1	0.773799	0.677520	0.640619	0.313731
0	2	-0.022602	-0.413642	-0.045655	-0.206164
1	0	1.225600	3.688480	-0.553412	0.387558
1	1	1.302010	-8.763200	1.458350	-5.257410
1	2	-1.429360	4.726300	-1.046710	2.613180
2	0	0.279154	-2.163190	2.369980	-1.745840
2	1	-2.620830	6.400390	-5.033900	4.640630
2	2	1.824190	-3.614890	2.821140	-2.369910

表 A2.6.3 関東式の有効範囲

全ての条件に対して	$a/c > 0.2; a/t < 0.95$
膜応力に対して (深さ方向)	$a/t > 0.55$
膜応力に対して (長さ方向)	$a/t > 0.25$
曲げ応力に対して (深さ方向)	$a/t > 0.27$
曲げ応力に対して (長さ方向)	$a/t > 0.43$

### A2.6.5 JEAC4206 式

JEAC4206 の半楕円き裂に対する応力拡大係数<sup>11)</sup>を以下に示す。

$$K_I = 0.03162\sqrt{\pi a} \left[ A_0 \frac{\Theta_1}{\phi_1} + a A_1 \frac{\Theta_2}{\phi_2} + a^2 A_2 \frac{\Theta_3}{\phi_3} + a^3 A_3 \frac{\Theta_4}{\phi_4} \right] \quad (2.6.9)$$

$A_0 \sim A_3$  : 容器壁内の応力分布を次式で近似したときの係数

$$\sigma = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3$$

$\sigma$  : 応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$X$  : 容器壁内の位置 (内表面からの距離)

$a$  : 欠陥深さ (mm)

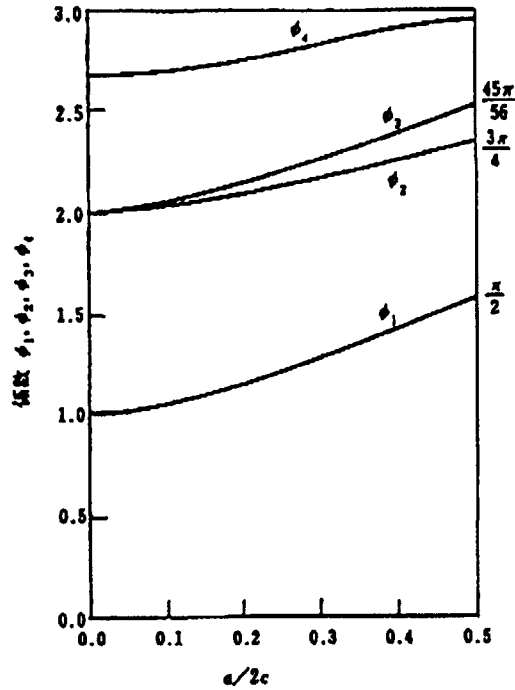


図 A2.6.4 パラメータ  $\phi_1 \sim \phi_4$  の評価図

また、

$$\begin{aligned}
 \Theta_1 & : = (1 - k^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{4}} \\
 \Theta_2 & : = \Theta_1 \cdot \sin \theta \\
 \Theta_3 & : = \Theta_1 \left( 1 - \frac{2\phi_1}{\phi_2 + 2\phi_1} \cos^2 \theta \right) \\
 \Theta_4 & : = \Theta_1 \left[ 1 - \frac{2\phi_1\phi_2}{\phi_3(\phi_2 + 2\phi_1) + 2\phi_1\phi_2} \cos^2 \theta \right] \\
 k & : = \frac{c^2 - a^2}{c^2}
 \end{aligned} \tag{2.6.10}$$

- $c$  : き裂表面長さの半長 (mm)
- $\theta$  : 欠陥の先端位置を表す角度 (最深部  $\theta = \pi/2$ )
- $\phi_1 \sim \phi_4$  : 係数 (図 A2.6.4 参照)

である。

膜・曲げ応力に対して、Newman-Raju の解と白鳥の解の比較事例を図 A2.6.5 に、Newman-Raju の解と関東の解の比較事例を図 A2.6.6 に示す。この比較では、トランジェントなどの解析条件に関しては、NRC/EPRI 主催の PTS 事象に関する PFM ベンチマーク解析<sup>12)</sup>で設定した解析条件を用いており、応力に関しては、トランジェントの 10 分での応力を用いている。NRC/EPRI ベンチマーク解析の詳細な解析条件に関しては第 4 章を参照して頂きたい。

また、3 次多項式応力分布に関して、白鳥の解と JEAC の解の比較事例を図 A2.6.7

に示す。この比較では、トランジェントなどの解析条件に関しては、前述の NRC/EPRI ベンチマーク解析<sup>12)</sup>で設定した解析条件を用いており、半楕円き裂のアスペクト比を 1 としている。

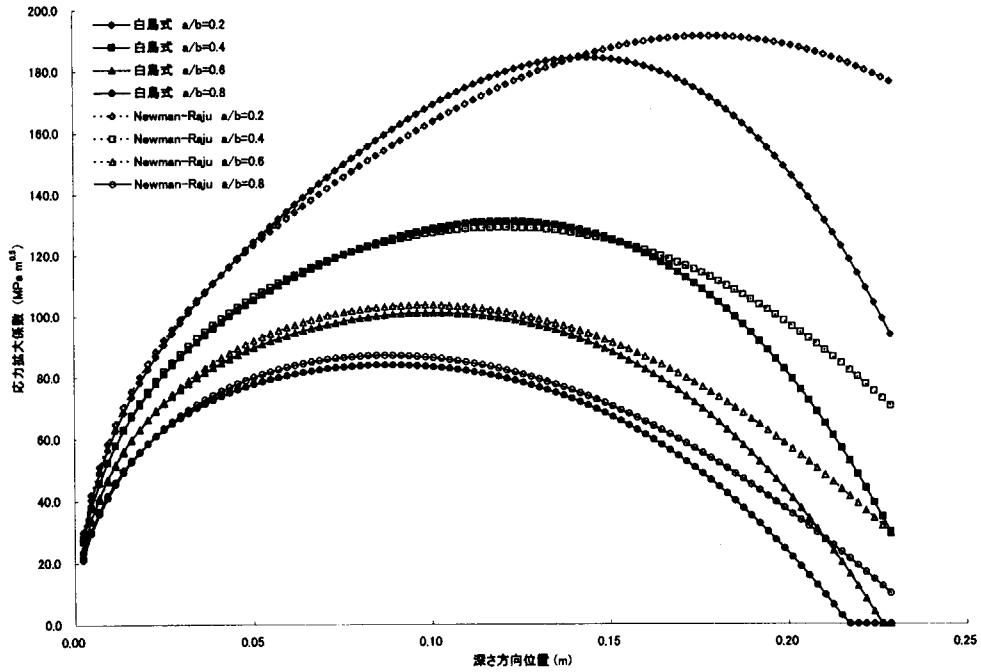


図 A2.6.5 Newman-Raju の解と白鳥の解の比較事例

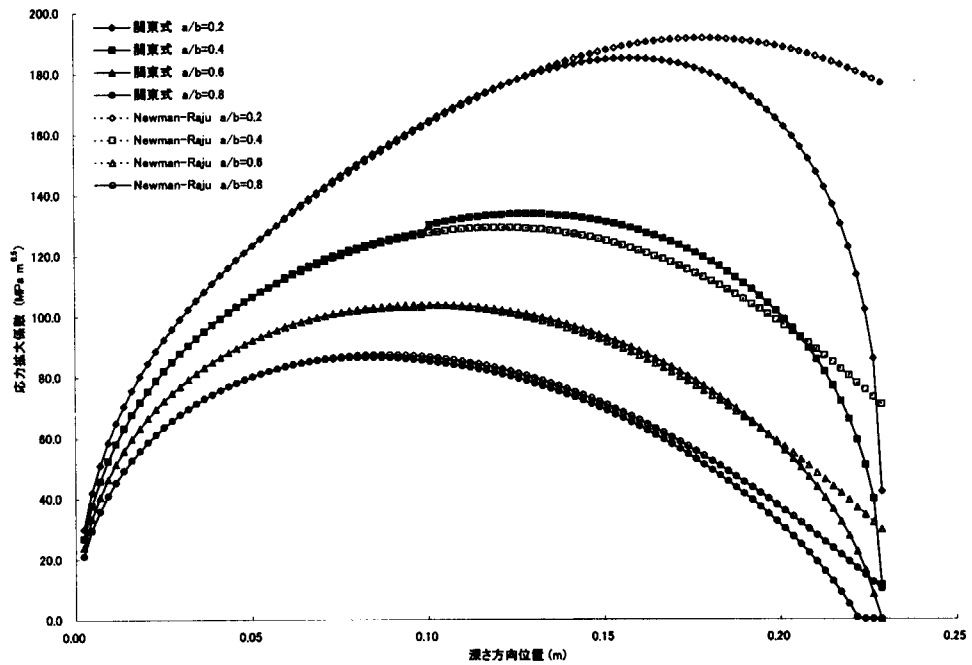


図 A2.6.6 Newman-Raju の解と関東の解の比較事例

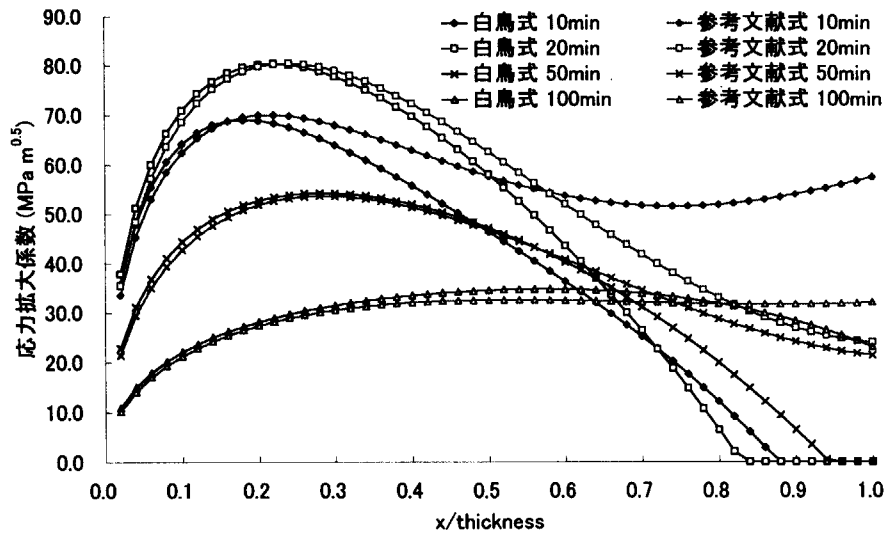


図 A2.6.7 白鳥の解と JEAC の解の比較事例



## A2.7 クラッド効果を考慮する場合の応力拡大係数

通常、クラッド効果を考慮する場合は、クラッドと母材の材料特性が異なるため、クラッドに大きな引張り応力が発生する。き裂先端がクラッド部に存在する場合はこれまでの応力拡大係数を適用できるが、き裂先端が母材に入る場合は、応力拡大係数に関する計算はクラッド部の応力集中を適切に考慮する必要がある。本解析コードでは、クラッド効果を考慮する場合の応力拡大係数の評価手法としては

- ・重ね合わせ原理に基づいた簡易法
- ・影響関数法

の2つを適用することができる。

簡易法は近似手法であるが、無限長き裂、半楕円き裂の両方に適用することができる。影響関数法は無限長き裂に関して、容器形状が平板と仮定しても差し支えない場合は適用することができる。

### A2.7.1 簡易法

一般的には、クラッドの肉厚は母材の肉厚の数パーセント(2%程度)に過ぎない。そのため、簡易法<sup>13),14)</sup>はクラッドの肉厚が母材に比べて十分小さいと仮定し、重ね合わせの原理に基づいて、応力拡大係数の計算を実施している。簡易法は膜・曲げ応力、及び3次多項式応力分布について適用することができる。また、無限長き裂、半楕円き裂の両方についても適用することができる。

簡易法の概念図及び計算手順を図A2.7.1に示す。

以下では、簡易法による応力拡大係数の計算方法について、ステップごとに説明する。応力の座標系を図A2.7.2に示す。また、応力の分布を図A2.7.3と式(2.7.1)に示す。

$$\begin{aligned}\sigma_{Bozai} &= c_{11}\xi^3 + c_{12}\xi^2 + c_{13}\xi + c_{14} \\ \sigma_{Clad} &= c_{21}\xi^3 + c_{22}\xi^2 + c_{23}\xi + c_{24}\end{aligned}\quad (2.7.1)$$

#### (1) 第1ステップ

第1ステップでは図A2.7.4に示す応力分布に対する応力拡大係数を算出する。つまり、クラッドの応力から母材の応力を引いた応力を用いればよい。応力の算出式を式(2.7.2)に示す。

$$\sigma_{Step1} = (c_{21} - c_{11})\xi^3 + (c_{22} - c_{12})\xi^2 + (c_{23} - c_{13})\xi + (c_{24} - c_{14}) \quad (2.7.2)$$

#### (2) 第2ステップ

第2ステップは母材の応力を用いて応力拡大係数を算出すればよい。応力の算出式を式(2.7.3)式に示す。

$$\sigma_{Step2} = c_{11}\xi^3 + c_{12}\xi^2 + c_{13}\xi + c_{14} \quad (2.7.3)$$

#### (3) 第3ステップ

第3ステップで考慮する応力分布を図A2.7.5に示す。これはステップ1の応力分布からクラッド部の応力を取り除いたものに等しい。

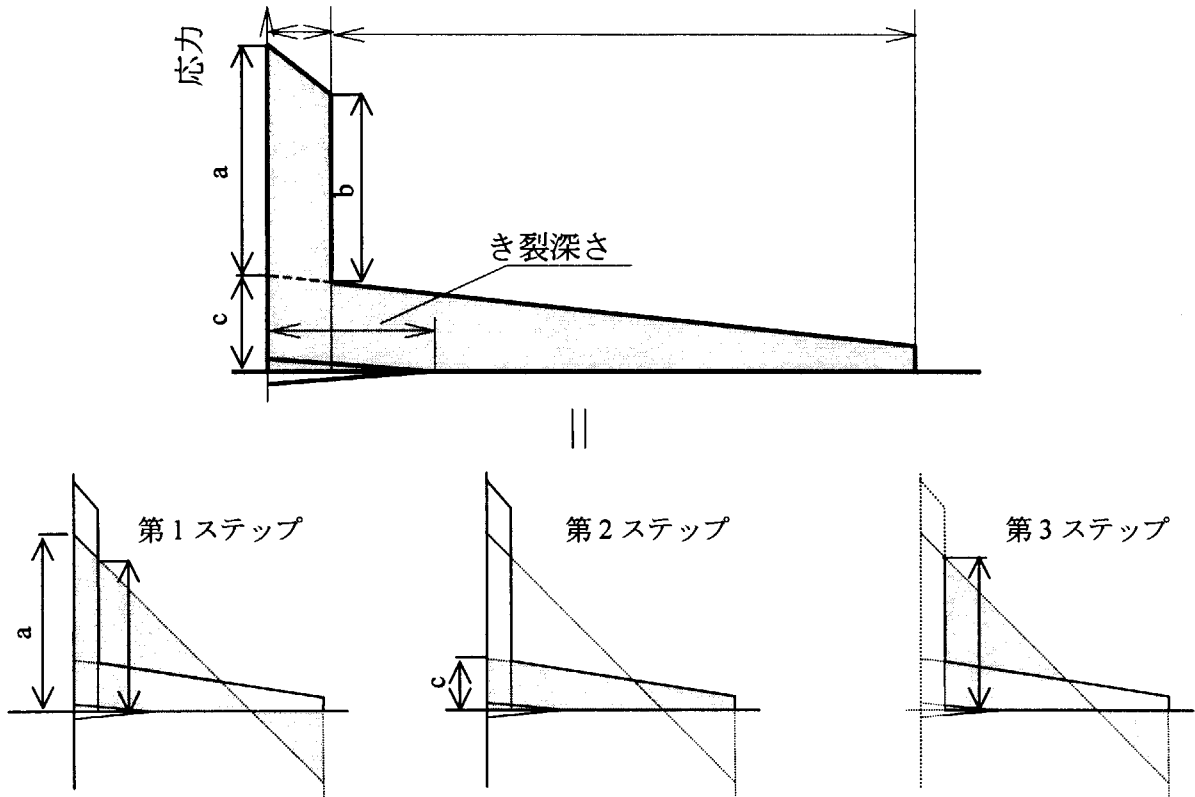


図 A2.7.1 簡略法による応力拡大係数の概念図

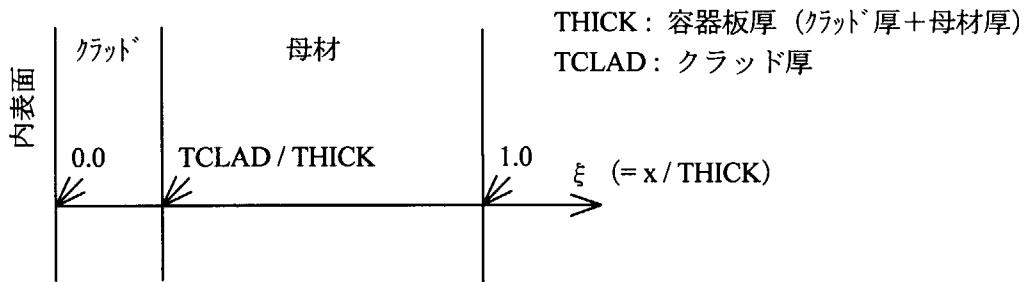


図 A2.7.2 応力分布に対する入力座標系 (クラッドを考慮)

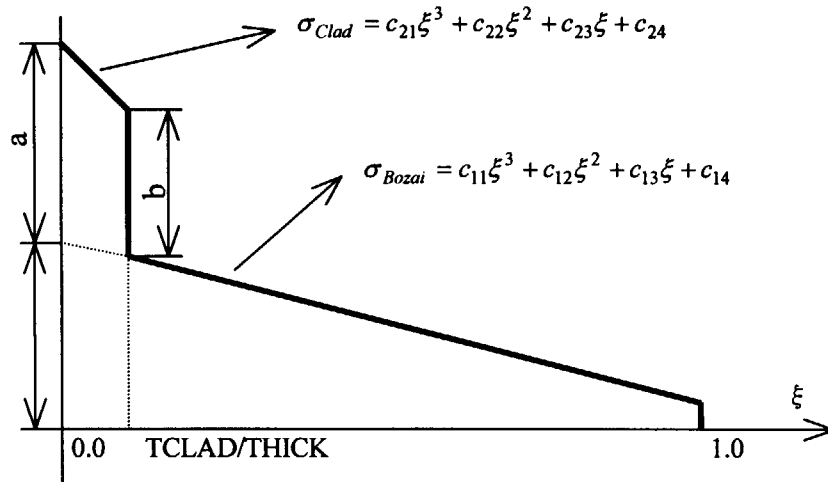


図 A2.7.3 入力で用いる応力分布式および係数

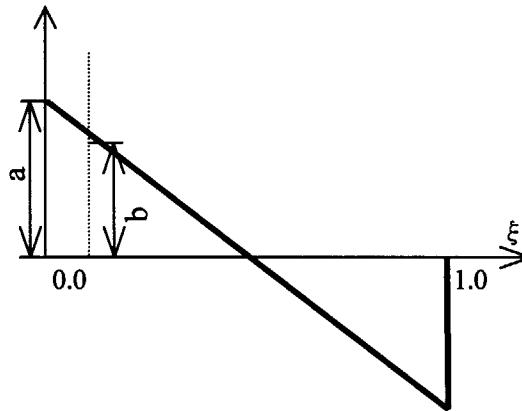


図 A2.7.4 第1ステップ応力算出図

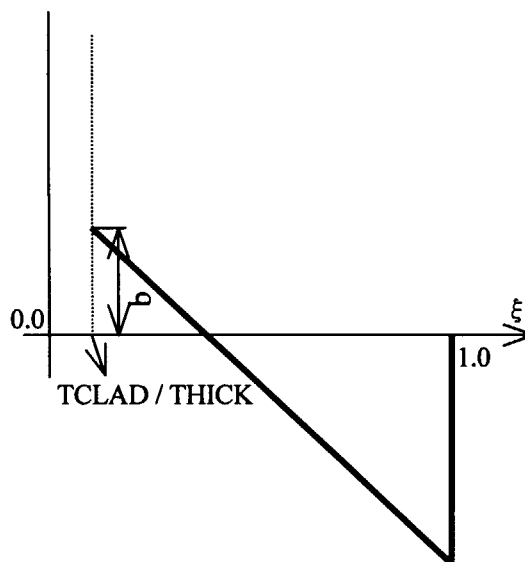


図 A2.7.5 第3ステップ応力算出図

ここで、3次多項式の応力分布に対する応力拡大係数算出は、容器内表面を 0.0、容器外表面を 1.0 とする座標系を用いる必要がある。従って、ここで、図 A2.7.5 の応力分布に対して座標変換を施す。座標変換の前後の座標系を図 A2.7.6 に示す。

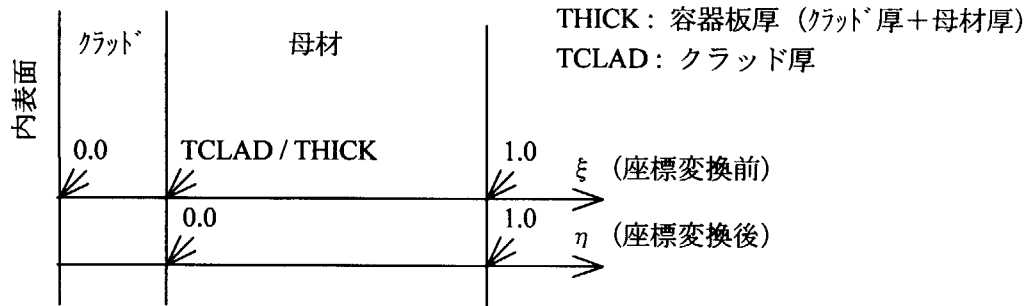


図 A2.7.6 第3ステップにおける座標変換

座標変換式を以下に示す。

$$\xi = \left(1.0 - \frac{TCLAD}{THICK}\right)\eta + \frac{TCLAD}{THICK} \quad (2.7.4)$$

上式を利用すると、以下に示すステップ3で用いる応力分布を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_{Step3} = & c_1 A^3 \eta^3 + (3c_1 A^2 B + c_2 A^2) \eta^2 \\ & + (3c_1 A B^2 + 2c_2 A B + c_3 A) \eta + (c_1 B^3 + c_2 B^2 + c_3 B + c_4) \end{aligned} \quad (2.7.5)$$

ただし、 $A = 1.0 - TCKAD/THICK$ 、 $B = TCKAD/THICK$ 、 $c_1 = c_{21} - c_{11}$ 、 $c_2 = c_{22} - c_{12}$ 、 $c_3 = c_{23} - c_{13}$ 、 $c_4 = c_{24} - c_{14}$  である。

クラッド部分の応力を取り去った計算を行うため、き裂深さ  $a$  は本来のき裂深さからクラッド厚を引いたものを用いる。また同様な理由により肉厚には母材厚を用いる。

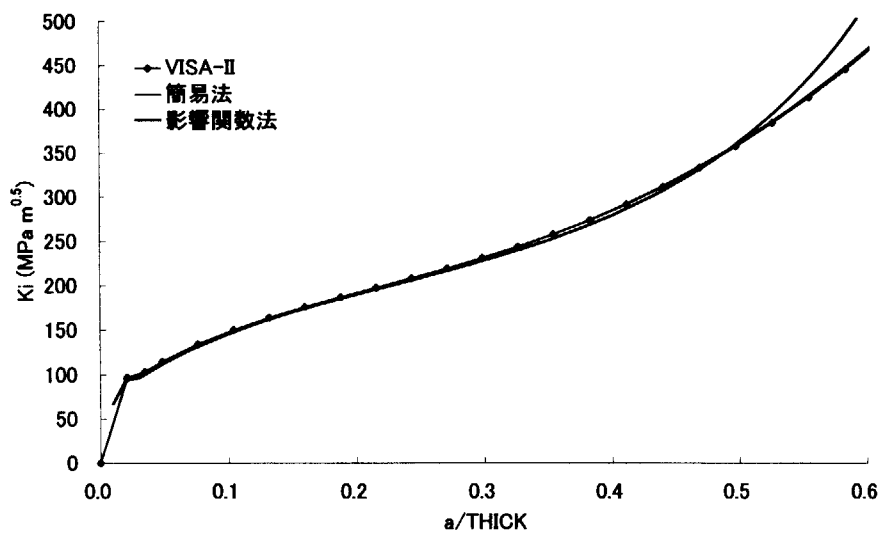
### A2.7.2 影響関数法

無限長き裂に関して、円筒形容器が平板と仮定しても差し支えない場合は、影響関数法を用いて、クラッド効果を考慮する場合の応力拡大係数を計算することができる。分布荷重に対する応力拡大係数を以下のように算出できる。

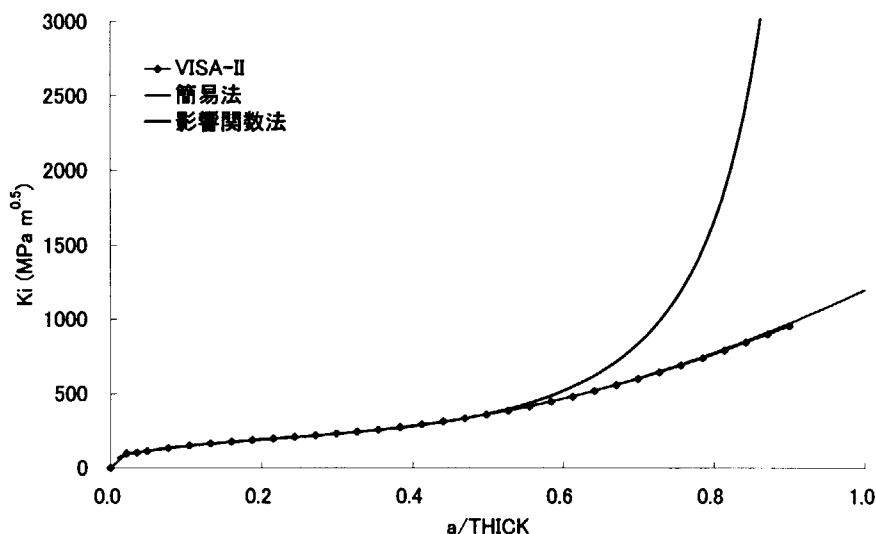
$$K_{I(total)} = \int_0^1 \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \sigma(x) F(x) dx \quad (2.7.6)$$

ただし、 $F$  は 2.5.4 節に示す単位荷重による応力拡大係数の補正係数、 $x=ca$ 、 $a$  はき裂深さ、 $c$  は単位荷重の作用位置である。

1 例として、軸方向無限長き裂について、簡易法による応力拡大係数、及び影響関数法による応力拡大係数の比較を図 A2.7.7 に示す。応力に関しては、NRC/EPRI ベンチマーク基本問題のトランジェント 20 分における応力を用いている。き裂深さが大きい場合の簡易法と影響関数法の違いは考慮した対象構造物の形状の違い (簡易法: 円筒形容器、影響関数法: 平板) によるものであると考えられる。



(a) き裂深さのより低い区間



(b) 容器全肉厚区間

図 A2.7.7 簡易法と影響関数法による応力拡大係数の比較

A2.7.3 影響関数式から3次多項式応力分布による応力拡大係数への切替え機能

(1)解析方法

肉盛り溶接付き圧力容器における無限長亀裂の解析を対象に、所定亀裂深さにおいて応力拡大係数計算式の切替え機能を有する。この機能によりクラッド-母材境界での不連続な応力分布に正確に対応できるとともに深い亀裂に対しても高い精度が実現できる。この機能は下記のように行っている。

- ・入力応力分布は、クラッド部及び母材部に分けて3次多項式で入力する。
- ・切替え前の亀裂に対しては、影響関数法を用いて応力拡大係数を計算する。
- ・切替え後は、PASCALの3次多項式応力分布用応力拡大係数解により応力拡大係数を求める。

- ・切替え亀裂深さは、入力データにより与える。以下の検討結果から切替え深さのデフォルト値として軸方向亀裂に対しては板厚の 50%、周方向亀裂に対しては 15%を与えている。

(2)切替え深さの決定

肉盛り溶接付き圧力容器における無限長き裂の応力拡大係数に関しては、浅いき裂に対して影響関数法、深いき裂に関して PASCAL の 3 次応力分布に対応した応力拡大係数を用いることとするが、異なる応力拡大係数の計算方法に対応した切替えき裂深さを決定する必要がある。そのため、下記のケーススタディを行った。

NRC/EPRI ベンチマーク問題について、クラッドを考慮した応力解析 (VISA-II コードによる弾性解析) を行いクラッド及び母材それぞれに対して 3 次多項式応力分布時刻歴を作成した。表 A2.7.1 及び表 A2.7.2 に結果を示す。この応力分布を基に各時間の影響関数法、母材の 3 次多項式応力及び VISA-II (クラッドを考慮) による応力拡大係数を求め比較した。時刻 20 分における軸方向亀裂及び周方向亀裂に対する応力拡大係数の比較を図 A2.7.8 及び A2.7.9 に例として示す。これらの結果から影響関数法は、軸方向亀裂に対しては 50%まで、周方向亀裂に対しては、15%まで適用性が良好であると推定される。

表 A2.7.1 軸方向応力分布に関する応力分布解析結果

時刻 (分)	母材の3次応力分布の係数				クラッドの3次応力分布の係数			
	3次	2次	1次	0次	3次	2次	1次	0次
10	-5.8165E+02	1.5955E+03	-1.5518E+03	4.2012E+02	0.0	0.0	-1.9957E+03	5.8282E+02
20	2.5955E+00	6.3060E+02	-1.2403E+03	4.3947E+02	0.0	0.0	-1.5364E+03	6.5266E+02
30	1.4600E+02	2.6870E+02	-9.3929E+02	3.7338E+02	0.0	0.0	-1.1615E+03	6.0474E+02
40	1.5045E+02	1.5078E+02	-7.2279E+02	3.0311E+02	0.0	0.0	-8.9456E+02	5.4297E+02
50	1.2600E+02	1.0357E+02	-5.6125E+02	2.4405E+02	0.0	0.0	-6.9505E+02	4.8917E+02
60	1.0029E+02	7.7573E+01	-4.3720E+02	1.9701E+02	0.0	0.0	-5.4164E+02	4.4592E+02
70	7.8700E+01	5.9790E+01	-3.4088E+02	1.6009E+02	0.0	0.0	-4.2248E+02	4.1190E+02
80	6.1509E+01	4.6488E+01	-2.6583E+02	1.3124E+02	0.0	0.0	-3.2962E+02	3.8528E+02
90	4.8017E+01	3.6240E+01	-2.0730E+02	1.0871E+02	0.0	0.0	-2.5719E+02	3.6449E+02
100	3.7473E+01	2.8271E+01	-1.6163E+02	9.1133E+01	0.0	0.0	-2.0068E+02	3.4827E+02

表 A2.7.2 周方向応力分布に関する解析結果

時刻 (分)	母材の3次応力分布の係数				クラッドの3次応力分布の係数			
	3次	2次	1次	0次	3次	2次	1次	0次
10	-5.8178E+02	1.5967E+03	-1.5597E+03	4.5820E+02	0.0	0.0	-2.0037E+03	6.2091E+02
20	2.4681E+00	6.3178E+02	-1.2482E+03	4.7755E+02	0.0	0.0	-1.5443E+03	6.9074E+02
30	1.4587E+02	2.6988E+02	-9.4723E+02	4.1147E+02	0.0	0.0	-1.1694E+03	6.4283E+02
40	1.5033E+02	1.5196E+02	-7.3074E+02	3.4120E+02	0.0	0.0	-9.0249E+02	5.8106E+02
50	1.2588E+02	1.0474E+02	-5.6919E+02	2.8213E+02	0.0	0.0	-7.0297E+02	5.2726E+02
60	1.0017E+02	7.8748E+01	-4.4514E+02	2.3509E+02	0.0	0.0	-5.4956E+02	4.8401E+02
70	7.8572E+01	6.0964E+01	-3.4882E+02	1.9818E+02	0.0	0.0	-4.3040E+02	4.4998E+02
80	6.1382E+01	4.7662E+01	-2.7377E+02	1.6932E+02	0.0	0.0	-3.3754E+02	4.2336E+02
90	4.7890E+01	3.7415E+01	-2.1524E+02	1.4680E+02	0.0	0.0	-2.6511E+02	4.0258E+02
100	3.7346E+01	2.9446E+01	-1.6957E+02	1.2922E+02	0.0	0.0	-2.0860E+02	3.8636E+02

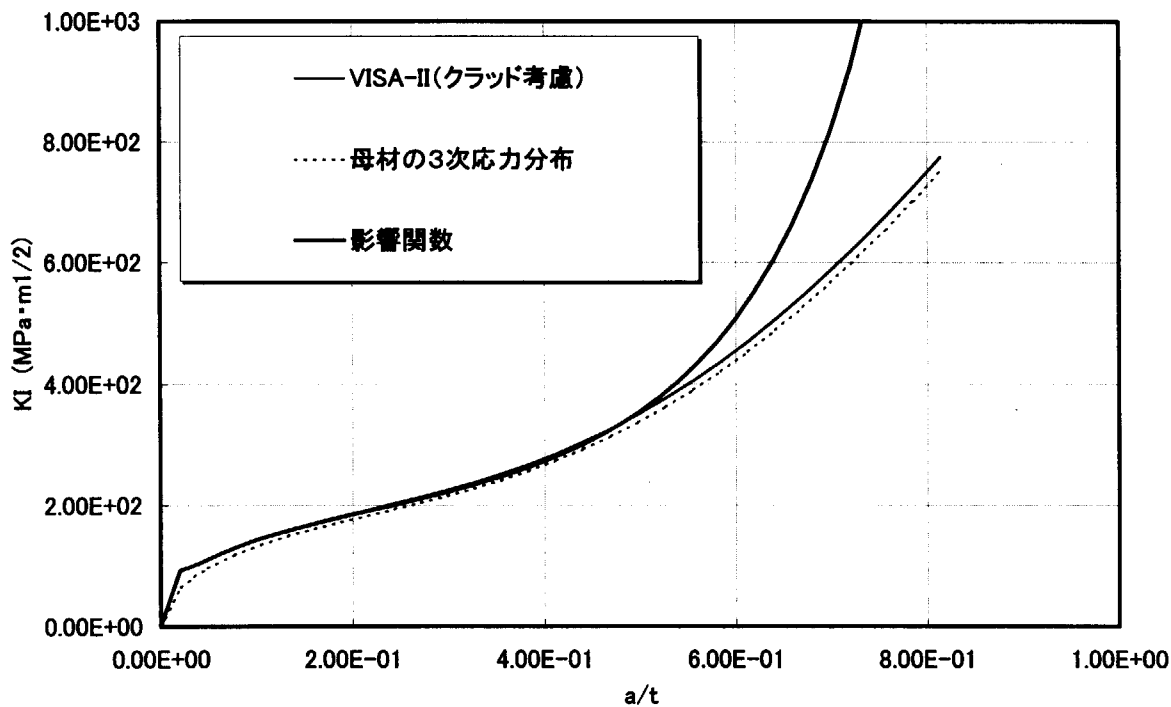


図 A2.7.8 時刻 20 分における軸方向亀裂の応力拡大係数の比較

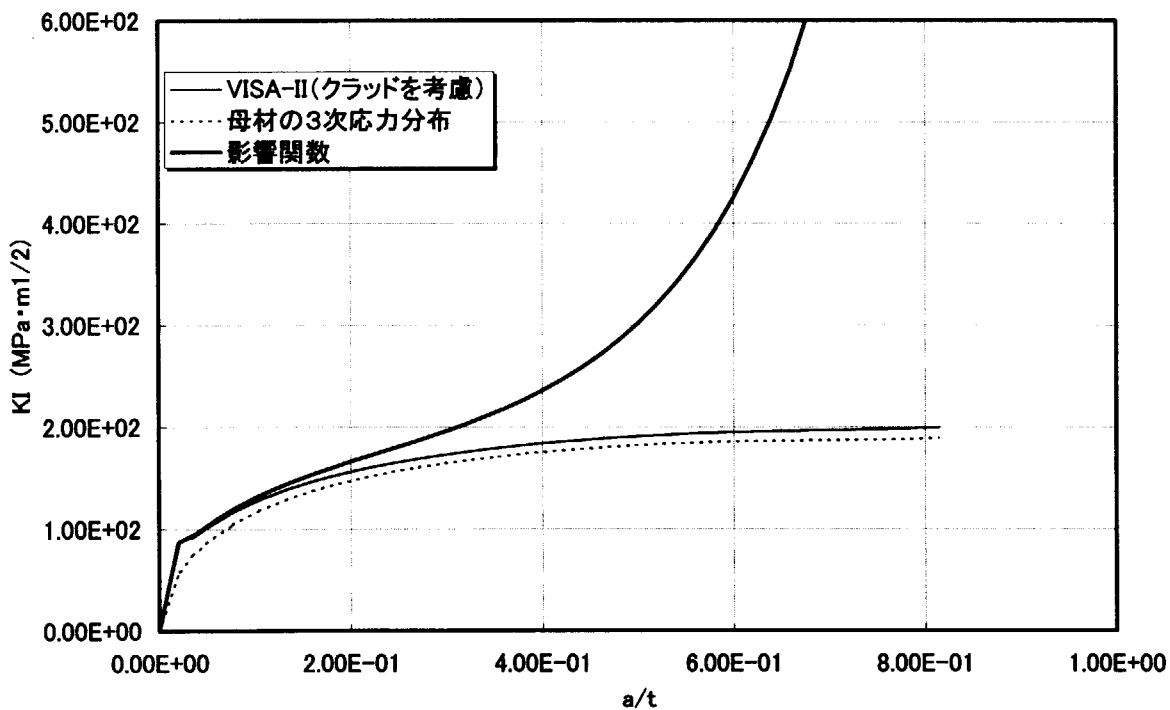


図 A2.7.9 時刻 20 分における周方向亀裂の応力拡大係数の比較

## (3) 破損確率解析例

切替え機能を利用し、NRC/EPRI ベンチマーク問題(A5,B5)にクラッドを付与した条件で破損確率を解析した。応力拡大係数計算の切替え深さに関して、軸方向亀裂については  $t=0.4$  及び  $0.5$ 、周方向亀裂については  $t=0.15$  及び  $0.17$  とした。

解析結果を表 A2.7.3 及び A2.7.4 に示す。両ケースとも切替え深さによる差は生じない。また、軸方向亀裂については VISA-II による解析と概ね一致することが分かる。両者の差は、応力拡大係数の差から生じているものであるが、破壊確率に対して支配的な板厚 50%までの亀裂に対して影響関数法により正確な応力拡大係数を算定している。一方 VISA-II では、肉厚方向に約 35 点に分割し、クラッドが存在する場合はその内側と外側に延べ 2 点を設置し、各点での温度、応力、応力拡大係数を予めセットしておき、必要に応じて線形補間により温度、応力、応力拡大係数を求めている。例えば、クラッドの応力拡大係数については線形分布となっている。従って、軸方向亀裂については、PASCAL による解析は VISA-II より精度が高いと推定される。なお、軸方向亀裂に対する破壊確率を図 A2.7.10 に比較する。

一方、周方向亀裂に関しては、VISA-II の結果に対して亀裂進展確率は一致するが、図 A2.7.11 から分かるように破壊確率にはかなり差が生じているこの理由は、応力拡大係数の差によるものである。図 A2.7.12 に亀裂深さ 20%までの応力拡大係数を比較する。PASCAL の応力拡大係数は深さ 15%までは精度が高く亀裂進展確率については特に問題無いと思われるが、15%付近における切替えに伴い応力拡大係数が不連続が生じ VISA-II の応力拡大係数より低くなるため破壊確率に差が生じたものである。但し、15%以上の亀裂に対する応力拡大係数の精度については、どちらが高いかは現時点では分からないので今後の検討が必用と思われる。

表 A2.7.3 軸方向き裂の破損確率の比較

フルエンス ( $\times 10^{19}n/cm^2$ )	き裂進展確率			破壊確率		
	VISA-II	改良PASCAL ( $a/t=0.5$ )	改良PASCAL ( $a/t=0.4$ )	VISA-II	改良PASCAL ( $a/t=0.5$ )	改良PASCAL ( $a/t=0.4$ )
0.5	1.564E-1	1.414E-1	1.414E-1	4.356E-2	3.548E-2	3.438E-2
1.0	4.588E-1	4.631E-1	4.633E-1	3.515E-1	3.467E-1	3.444E-1
2.0	6.169E-1	6.634E-1	6.630E-1	5.992E-1	6.430E-1	6.420E-1
3.0	6.481E-1	7.204E-1	7.203E-1	6.438E-1	7.155E-1	7.154E-1

表 A2.7.4 周方向き裂の破損確率の比較

フルエンス ( $\times 10^{19}n/cm^2$ )	き裂進展確率			破壊確率		
	VISA-II	改良PASCAL ( $a/t=0.15$ )	改良PASCAL ( $a/t=0.17$ )	VISA-II	改良PASCAL ( $a/t=0.15$ )	改良PASCAL ( $a/t=0.17$ )
1.0	3.627E-1	3.614E-1	3.608E-1	7.170E-5	0.0	0.0
1.5	5.007E-1	5.233E-1	5.232E-1	2.356E-3	2.690E-5	2.650E-5
2.0	5.656E-1	6.046E-1	6.045E-1	2.265E-2	1.088E-3	1.086E-3
2.5	5.999E-1	6.513E-1	6.509E-1	7.551E-2	8.504E-3	8.510E-3
3.0	6.207E-1	6.811E-1	6.808E-1	1.543E-1	3.030E-2	3.026E-2



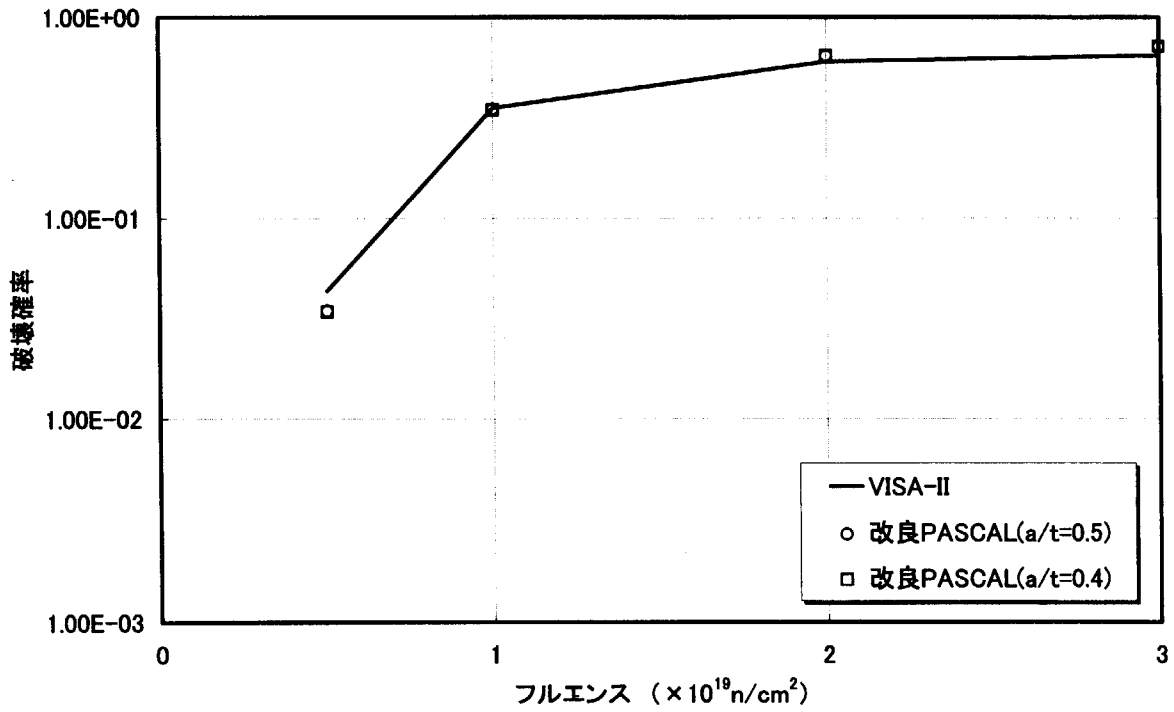


図 A2.7.10 軸方向き裂に対する破壊確率

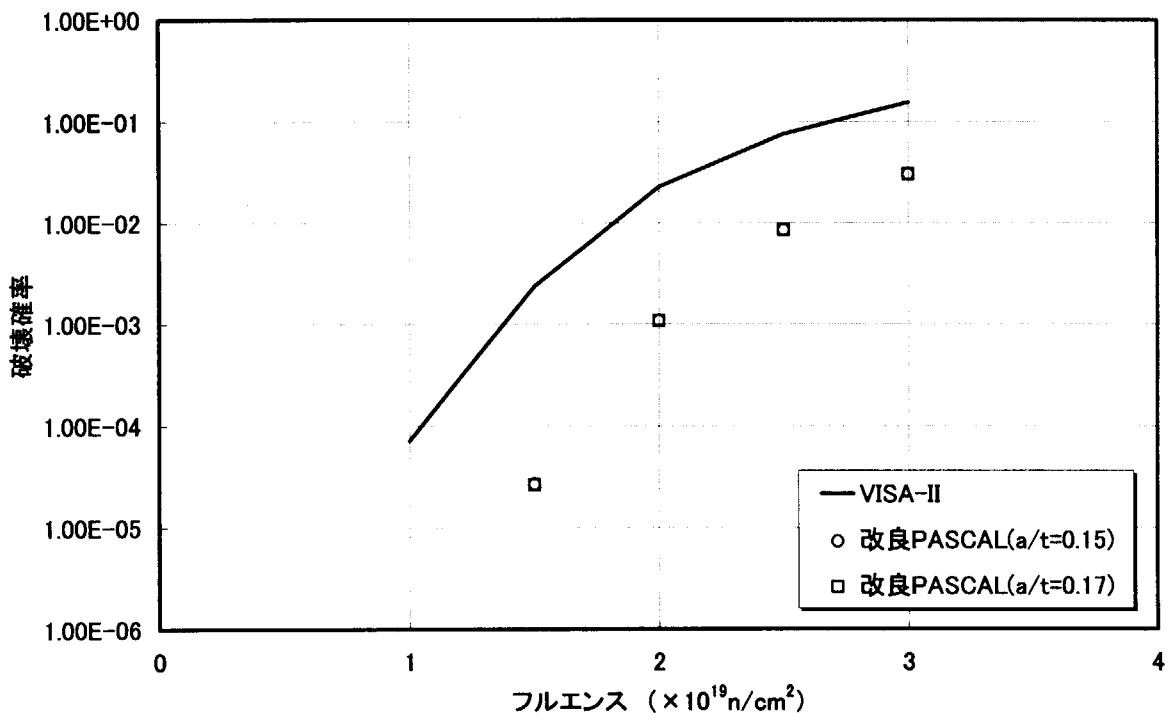


図 4.3.11 周方向き裂に対する破壊確率

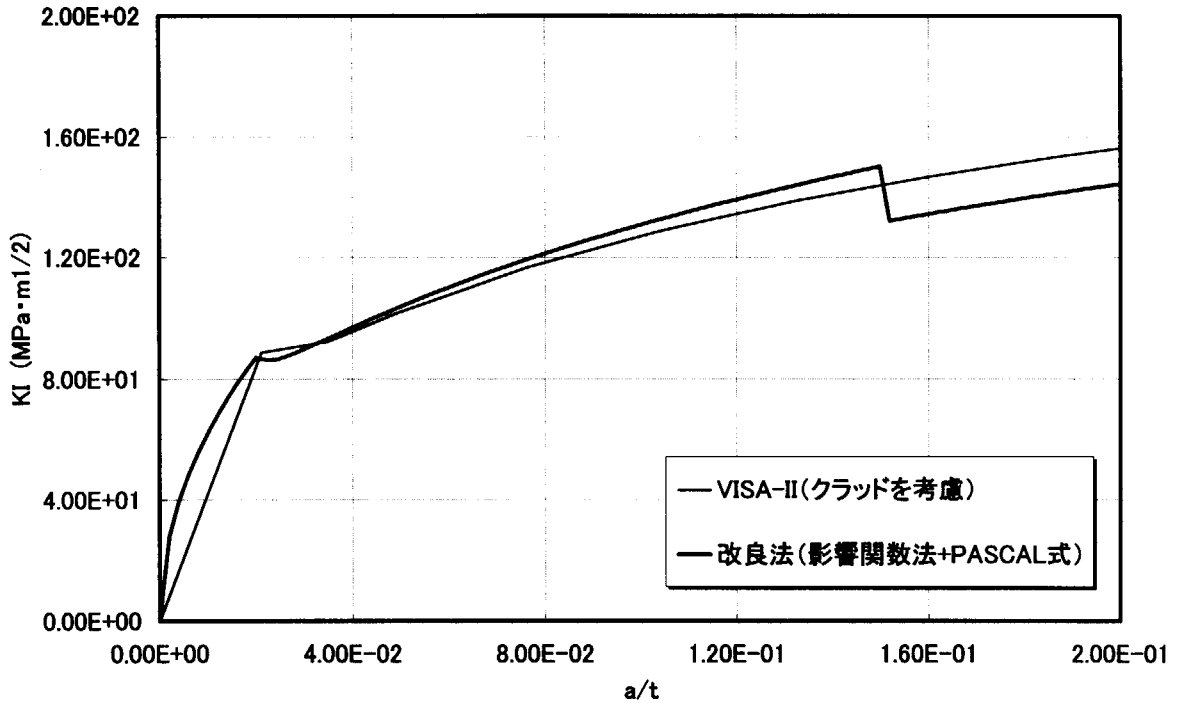


図 A2.7.12 過渡事象が 20 分における応力拡大係数の比較 (浅いき裂の詳細)

### A2.8 容器壁内フルエンス減衰評価方式

本解析コードでは、圧力容器内表面での中性子照射量について正規分布モデルを用いて評価する。また、照射量の容器肉厚方向の減衰について、以下の式で計算している。

$$F = F_0 e^{-ma} \quad (2.8.1)$$

ただし、

$F_0$  : 容器内表面での照射量

$m$  : 減衰定数

$a$  : 容器内表面までの距離

である。

多項式分布などの評価式も提案されているが、これに関しては、必要に応じてユーザ入力機能を利用することができる。

### A2.9 半楕円き裂進展の評価方式

PASCAL では、半楕円き裂に関して、以下に示す 3 つの進展方式の評価モデルを用意している。

#### (1) モデル A

き裂は深さ方向に進展したら、無限長き裂となる。その後の進展は無限長き裂と同じである。この進展モデルは VISA-II のモデルであり、安全側の評価モデルといわれた<sup>4)</sup>。

#### (2) モデル B

き裂は長さ方向に進展したら、無限長き裂となる。その後の進展は無限長き裂と同じである。

#### (3) モデル C

長さ方向と深さ方向のそれぞれの応力拡大係数を用いて、き裂進展・停止の判定を行う。半楕円き裂は半楕円き裂の形状を保ちながら、少しずつ進展していく。

これらの進展モデルの概念図を図 A2.9.1 に示す。

これまでの感度解析の結果<sup>15)~16)</sup>として、モデル A は安全側の評価となっておらず、モデル C は計算時間がかかるが、最も妥当な評価方式であることが確認した。

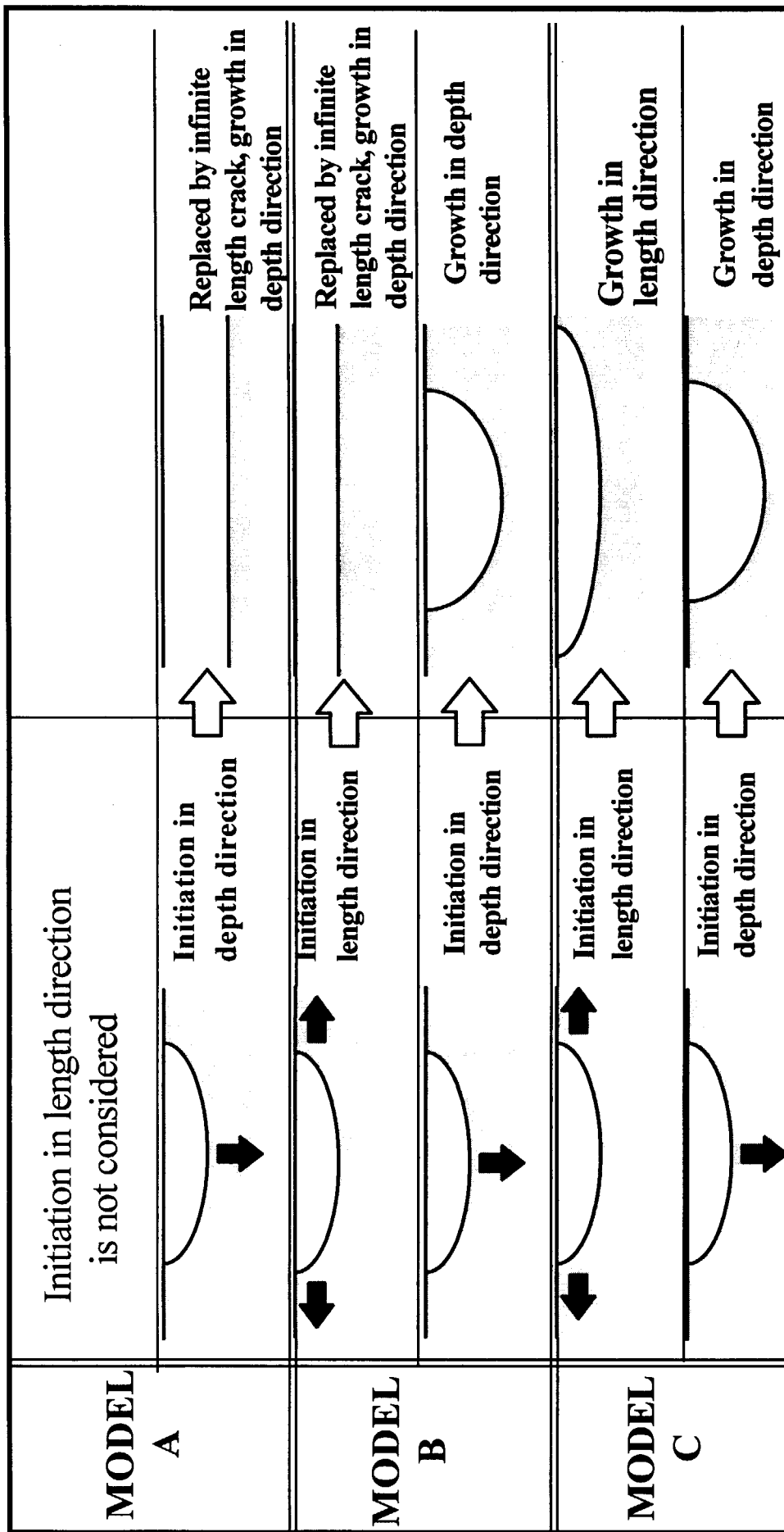


図 A2.9.1 き裂進展モデルの説明図

**A2.10 破壊靱性値の評価式****A2.10.1 NRC 平均曲線**

米国 NRC の破壊靱性値の平均曲線<sup>4)</sup>は次のようになる。

$$\bar{K}_{IC} = \begin{cases} 39.8 + 54.3 \exp[0.0187(T - RT_{NDT})], & MPa\sqrt{m} \\ T - RT_{NDT} \leq -28^\circ C \\ 60.6 + 30.8 \exp[0.0385(T - RT_{NDT})], & MPa\sqrt{m} \\ T - RT_{NDT} > -28^\circ C \end{cases} \quad (2.10.1)$$

$$\bar{K}_{Ia} = \begin{cases} 21.9 + 48.2 \exp[0.0179(T - RT_{NDT})], & MPa\sqrt{m} \\ T - RT_{NDT} \leq 28^\circ C \\ 77.0 + 7.14 \exp[0.0353(T - RT_{NDT})], & MPa\sqrt{m} \\ T - RT_{NDT} > 28^\circ C \end{cases} \quad (2.10.2)$$

ただし、

$T$  : 温度  
 $RT_{NDT}$  : 脆化温度

である。

**A2.10.2 ASME Sect. XI の下限曲線**

米国 ASME Sect. XI の破壊靱性値の下限曲線<sup>4)</sup>は次のようになる。

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - RT_{NDT} + 56)], \quad MPa\sqrt{m} \quad (2.10.3)$$

$$K_{Ia} = 29.5 + 1.344 \exp[0.0261(T - RT_{NDT} + 89)], \quad MPa\sqrt{m} \quad (2.10.4)$$

**A2.10.3 ORNL 平均曲線**

米国 ORNL の破壊靱性値の平均曲線<sup>17)</sup>は次のようになる。

$$\bar{K}_{IC} = 1.43 \times \{36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - RT_{NDT} + 56)]\}, \quad MPa\sqrt{m} \quad (2.10.5)$$

$$\bar{K}_{Ia} = 1.25 \times \{29.5 + 1.344 \exp[0.0261(T - RT_{NDT} + 89)]\}, \quad MPa\sqrt{m} \quad (2.10.6)$$

すなわち、式 (2.10.5) と式 (2.10.6) はそれぞれ、式 (2.10.3) と式 (2.10.4) の標準偏差 ( $\sigma$ ) が下限値の 15% と 10% のときの、 $2\sigma$  上乗せした予測曲線である。

上部靱性値が  $219.8 MPa\sqrt{m}$  の場合、以上各評価曲線の比較を図 A2.10.1 と図 A2.10.2 に示す。

**A2.10.4 JEAC4206 国内式**

JEAC4206 の破壊靱性予測式<sup>17)</sup>は以下に示す。

$$\begin{aligned} K_{Ic} &= 65.0 + 419.0 \exp[0.0161(T - 125)] && kg/mm^{3/2} \\ &= 20.16 + 129.94 \exp[0.0161(T - 125)] && MPa\sqrt{m} \end{aligned} \quad (2.10.7)$$

上式中の定数 125(= $T_{0J}$ )は、中性子照射量が  $10 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  の場合の温度(= $T_{0J\_0} + \Delta T_{K_{Ic}}$  ( $10^{20} \text{n/cm}^2$ ))である。従って、式(2.10.7)は以下のように表せる。

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.94 \exp[0.0161(T - T_{0J\_0} - \Delta T_{K_{Ic}})] \quad \text{MPa}\sqrt{m} \quad (2.10.8)$$

また、初期値( $T_{0J\_0}$ )は、国内脆化予測式に所定の値を代入して得られる  $\Delta T_{K_{Ic}} = 163.925^\circ\text{C}$  を差し引いて、 $T_{0J\_0} = -38.925^\circ\text{C}$  となる。

$K_{Ia}$  については、ASME の  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  下限曲線の等破壊靱性レベルでの温度差  $\Delta T_{a-C}$  を求め、これを JEAC の  $K_{Ic}$  曲線評価式に加えることにより定義する。

$$K_{Ia} = 20.16 + 129.94 \exp[0.0161(T - T_{0J\_0} - \Delta T_{K_{Ic}} - \Delta T_{a-C})] \quad \text{MPa}\sqrt{m} \quad (2.10.9)$$

式(2.10.8)及び式(2.10.9)は破壊靱性下限曲線に相当するものである。PASCAL では破壊靱性値のバラツキを考慮して、確率論的計算で用いる破壊靱性値の平均値を次式の形で評価する。

$$K_{Ic} = 1.43 \{ 20.16 + 129.94 \exp[0.0161(T - T_{0J\_0} - \Delta T_{K_{Ic}})] \} \quad \text{MPa}\sqrt{m} \quad (2.10.10)$$

$$K_{Ia} = 1.25 \{ 20.16 + 129.94 \exp[0.0161(T - T_{0J\_0} - \Delta T_{K_{Ic}} - \Delta T_{a-C})] \} \quad \text{MPa}\sqrt{m} \quad (2.10.11)$$

すなわち、式 (2.10.10) と式 (2.10.11) はそれぞれ式 (2.10.8) と式 (2.10.9) の標準偏差が下限値の 15% と 10% のときの、 $2\sigma$  上方修正した曲線である。

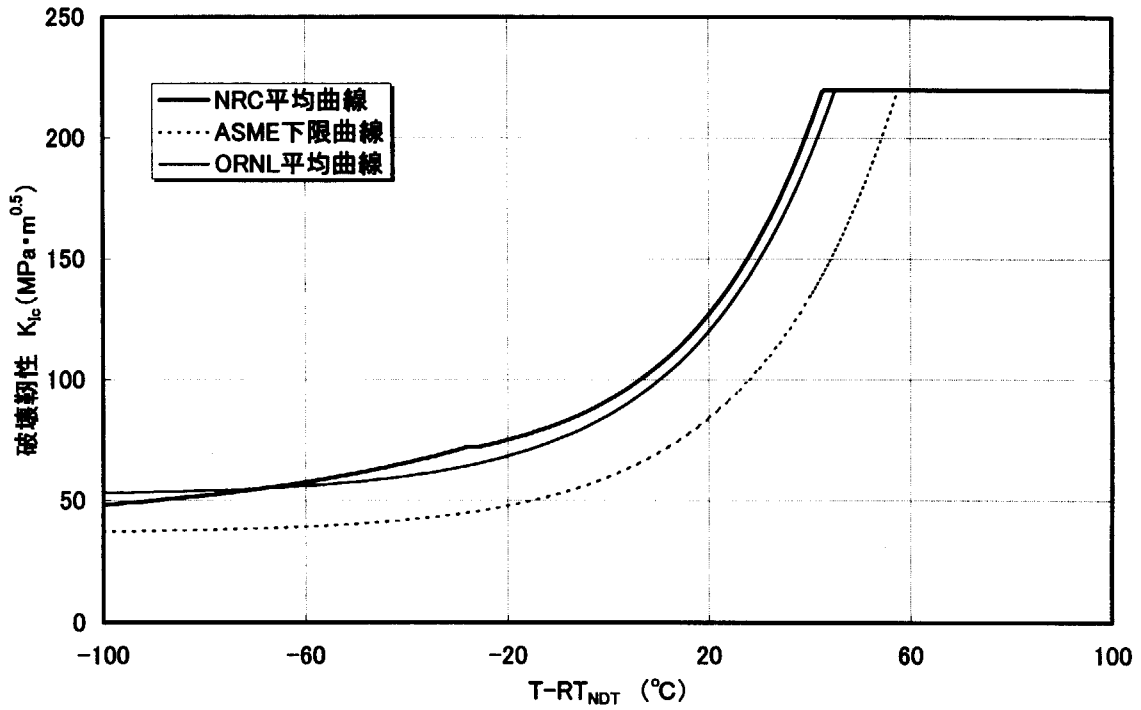


図 A2.10.1  $K_{Ic}$  各評価曲線の比較

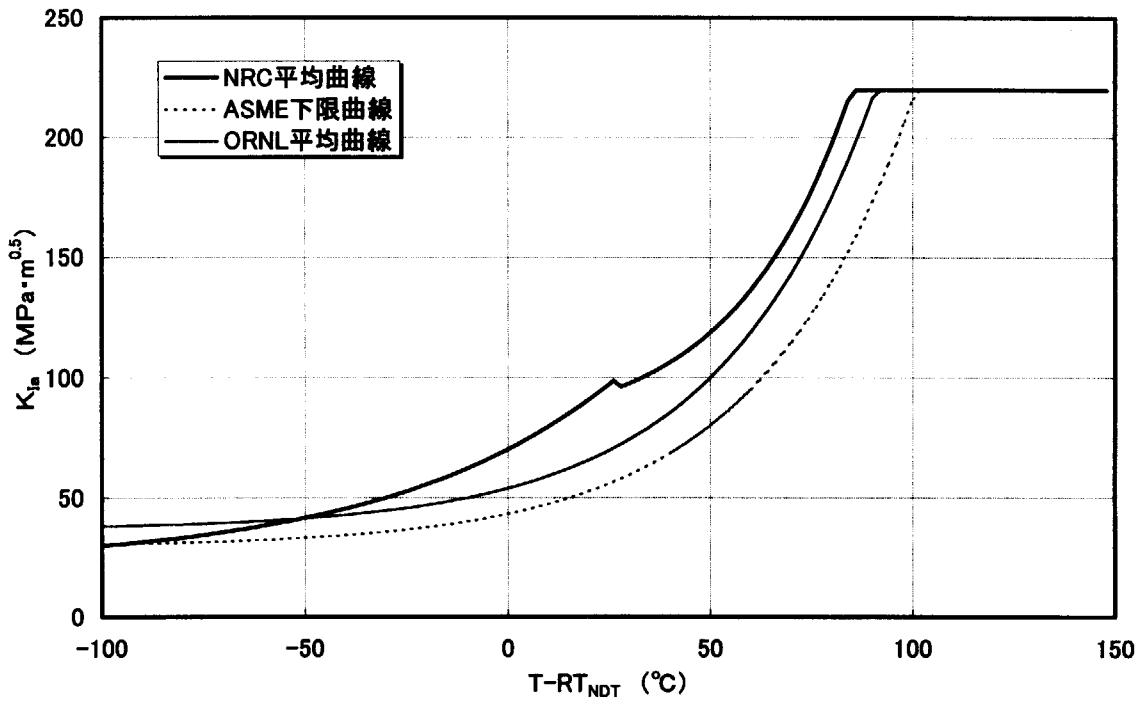


図 A2.10.2  $K_{Ia}$  各評価曲線の比較

## A2.11 脆化予測式

PASCAL では、脆化予測式に関しては以下の3つのモデルを考慮することができる。

- ・ JEAC4206 の国内予測式
- ・ 米国 RG1.99 Rev.2 式
- ・ ユーザ入力式

### A2.11.1 JEAC206 の国内脆化予測式

JEAC206 の国内脆化予測式<sup>18)</sup>は次式に示す。

$$\Delta RT_{NDT} = FF \cdot CF + \text{margin} \quad , \quad ^\circ\text{C} \quad (2.11.1)$$

ただし、 $FF$  は中性子照射ファクター (Fluence Factor) で、 $CF$  は化学成分ファクター (Chemistry Factor) である。

母材に対しては、

$$\begin{aligned} CF &= -16.0 + 1210.0 \cdot P + 215.0 \cdot Cu + 77.0 \sqrt{Cu \cdot Ni} \\ FF &= \left( F / 10^{19} \right)^{(0.29 - 0.04 \cdot \log_{10}(F / 10^{19}))} \\ \sigma &= 12.0, ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.11.2)$$

溶接材に対しては、

$$\begin{aligned} CF &= 26.0 - 24.0 Si - 61.0 \cdot Ni + 301.0 \sqrt{Cu \cdot Ni} \\ FF &= \left( F / 10^{19} \right)^{(0.25 - 0.10 \cdot \log_{10}(F / 10^{19}))} \\ \sigma &= 15.0, ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.11.3)$$

である。

### A2.11.2 米国 Regulatory Guide 1.99 (Rev.2)式

米国 Regulatory Guide 1.99 (Rev.2)式<sup>19)</sup>は次のように示す。

$$\Delta RT_{NDT} = FF \cdot CF \quad , \quad ^\circ\text{F} \quad (2.11.4)$$

ただし、 $FF$  について次式で評価する。

$$FF = \left( F / 10^{19} \right)^{(0.28 - 0.10 \cdot \log_{10}(F / 10^{19}))} \quad (2.11.5)$$

また、 $CF$  について、溶接材の場合は次式で評価する。

$$CF_{\text{weld}} = 360 \cdot Cu \{ 1 + 1.38 [\text{erf}((0.3 \cdot Ni - Cu) / Cu) + 1] \}, ^\circ\text{F} \quad (2.11.6)$$

母材の場合は以下の式の大きいほうで評価する。

$$CF_{\text{Gathrie}} = -38.2 + 574.6 \cdot Cu + 526.46 \cdot Cu \cdot \tanh(0.304 \cdot Ni / Cu), ^\circ\text{F} \quad (2.11.7)$$

$$CF_{\text{Odette}} = 388.8 \cdot Cu \{ 1 + 0.33 [\text{erf}((0.77 \cdot Ni - Cu) / Cu) + 1] \}, ^\circ\text{F} \quad (2.11.8)$$

以上の式において、 $\text{erf}$  は誤差関数である。

1例として、 $cu=0.3\text{wt}\%$ ,  $Ni=0.75\text{wt}\%$ 、溶接部の脆化予測式の比較を図 A2.11.1 に示す。



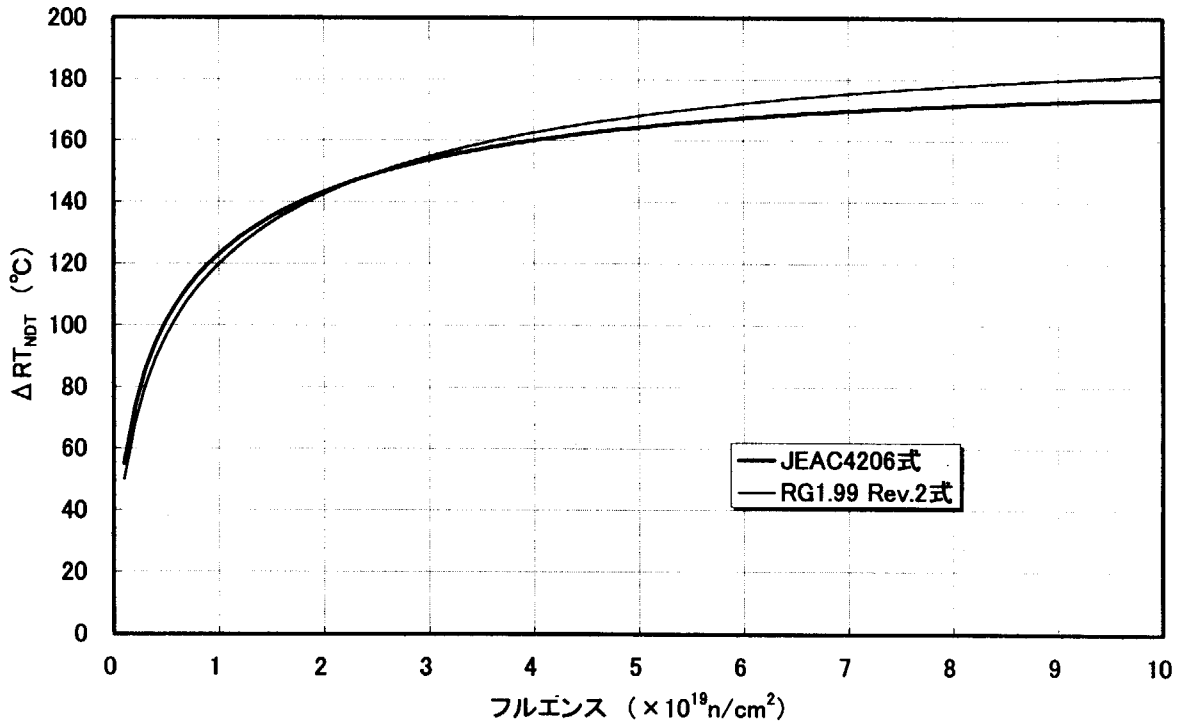


図 A2.11.1 JEAC4206 式と RG1.99 Rev.2 式の比較事例

### A2.12 偏差再計算手法

き裂進展に伴う  $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$ 、と  $RT_{NDT}$  の評価については、その評価方式はき裂進展確率に殆ど影響しないが、破壊確率に大きな影響を与える。PASCAL では、以下の3つの評価方式を考慮している。

#### (1) VISA-II 方式

この評価方式ではき裂が進展するごとに、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$ 、と  $RT_{NDT}$  の平均値と標準偏差の再計算を行う。

#### (2) OCA-P 方式

き裂が進展するごとに、標準偏差の再計算は  $RT_{NDT}$  について行わず、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  だけについて行う。

#### (3) NRC 推奨方式

き裂が進展するごとに、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$ 、と  $RT_{NDT}$  の平均値の再計算を行うが、標準偏差を最初に評価するときの値を用いる。

これまでの感度解析<sup>15)~16)</sup>から、NRC 推奨方式は最も高い破損確率をあたえることが分かる。また、VISA-II 方式及び OCA-P 方式はき裂進展刻みの大きさなどパラメータの変更に影響を受けやすい。

**A2.13 破壊クライテリア**

PASCALでは、以下の破壊クライテリアを考慮することができる。

- ・  $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  基準及び塑性崩壊基準
- ・ R6 法

**A2.13.1  $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  の基準**

き裂の進展が開始するときの判定基準<sup>4)</sup>は

$$K_I > K_{IC} \quad (2.13.1)$$

であり、き裂進展が停止するときの判定基準は

$$K_I \leq K_{Ia} \quad (2.13.2)$$

である。

また、以下の条件を満たすと破壊とみなす。

$$a = r \cdot t \quad (2.13.3)$$

ただし、 $a$  はき裂の深さ、 $t$  は容器壁の肉厚、 $r$  は破壊とみなす容器壁肉厚の割合である。PASCALでは、 $r$ をユーザによって設定することができる。

**A2.13.2 塑性崩壊基準**

塑性崩壊基準<sup>4)</sup>を以下に示す

$$\bar{\sigma}_p \geq \sigma_f \quad (2.13.4)$$

ここで、 $\sigma_f$  は流動応力、 $\bar{\sigma}_p$  は圧力による応力の平均値であり、軸方向き裂に対して、

$$\bar{\sigma}_p = \frac{P \cdot R}{(t-a)} \quad (2.13.5)$$

周方向き裂に対して、

$$\bar{\sigma}_p = \frac{P \cdot R}{2(t-a)} \quad (2.13.6)$$

である。この中で、 $P$  は内圧、 $a$  はき裂深さ、 $R$  は圧力容器内半径、 $t$  は容器の肉厚である。

**A2.13.3 R6 法(Rev.3)**

R6 法<sup>20)</sup>は英国中央電力庁 CEGB によって整備されたもので、線形弾性条件による破壊から塑性崩壊条件による破壊に至るまでの広範囲な破壊現象を統一的に取り扱う破壊基準で、“2クライテリア法”とも呼ばれる。この手法は3つの破損評価曲線と3つの材料カテゴリを用いて破損の判定を行う。

R6 法の詳細を次の節を参考して頂きたい。

### A2.14 R6 法の解析手順

R6 法では以下の 2 つのパラメータによって破壊の限界を表現する。

- ・線形破壊の尺度を表すパラメータ： $K_r$

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{mat}} + \left\{ \frac{K_I^S}{K_{mat}} + \rho \right\} \quad (2.14.1)$$

この中で、 $K_I^P$  と  $K_I^S$  はそれぞれ一次応力、二次応力による応力拡大係数、 $K_{mat}$  は破壊靱性値である。また、 $\rho$  は二次応力に対する補正係数、以下のように求められる。

$$\rho = \begin{cases} \rho_1 & L_r \leq 0.8 \\ 4\rho_1(1.05 - L_r) & 0.8 < L_r \leq 1.05 \\ 0 & 1.05 < L_r \end{cases} \quad (2.14.2)$$

$$\rho_1 = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.1x^{0.714} - 0.007x^2 + 0.0003x^5 & 0 < x \leq 5.2 \\ 0.25 & x > 5.2 \end{cases} \quad (2.14.3)$$

$$x = \frac{K_I^S}{K_I^P} L_r \quad (2.14.4)$$

- ・塑性崩壊の尺度を表すパラメータ： $L_r$

$L_r$  は 1 次応力のみによって影響されるもので、次のように求められる。

$$L_r = L_r^P = \frac{P}{P_Y} \quad (2.14.5)$$

ただし、 $P$  は作用荷重、 $P_Y$  は降伏限界荷重である。

#### A2.15.1 R6 法のオプションと解析カテゴリー

R6 法は上記  $K_r$  と  $L_r$  の 2 つのパラメータに基づいて、3 つの破損評価曲線と 3 つの材料カテゴリーを利用して線形破壊から塑性崩壊までの広範囲な破壊判定を行う。

PASCAL では R6 法のオプション 1 とオプション 2 を考慮することができる。これらのオプションを以下に示す。

- ・オプション 1 の破壊評価曲線：

$$K_r = \begin{cases} \left\{ (1 - 0.14L_r^2) \left( 0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6) \right) \right\} & L_r \leq L_r^{\max} \\ 0 & L_r > L_r^{\max} \end{cases} \quad (2.14.5)$$

このオプションの 1 例を図 A2.14.1 に示す。

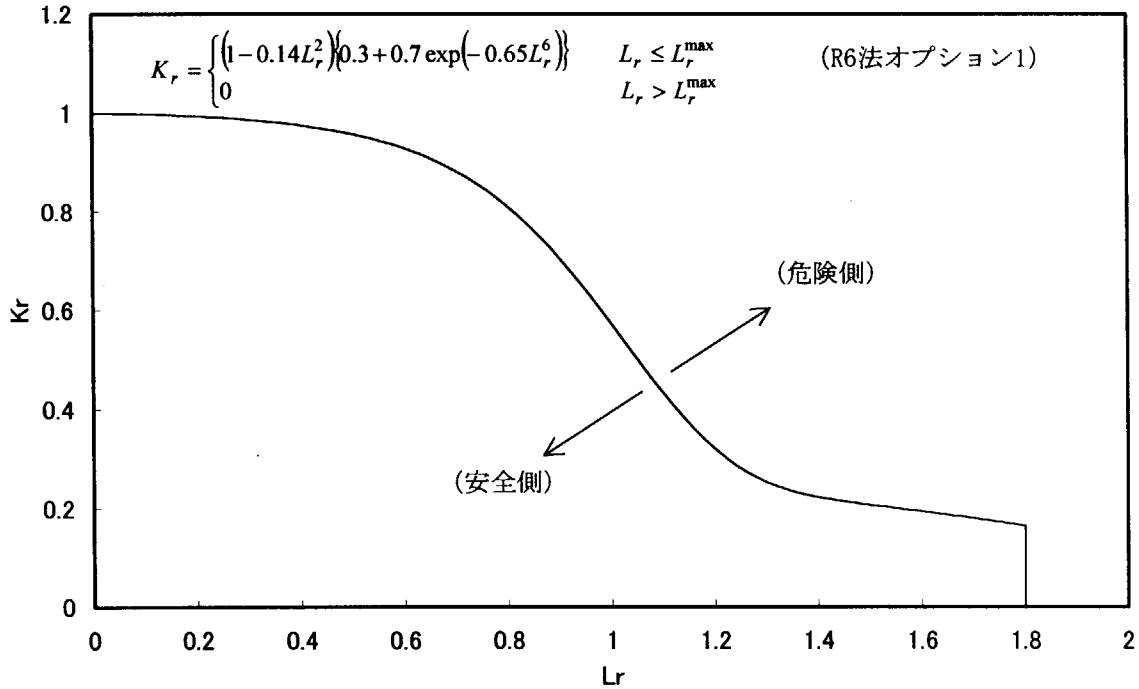


図 A2.14.1 破壊評価曲線オプション1の1例

・オプション2の破壊評価曲線：

$$K_r = \begin{cases} \left( \frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{L_r^3\sigma_y}{2E\varepsilon_{ref}} \right)^{-\frac{1}{2}} & L_r \leq L_r^{\max} \\ 0 & L_r > L_r^{\max} \end{cases} \quad (2.14.6)$$

ただし、

$\varepsilon_{ref}$  : 真応力  $L_r\sigma_y$  に対応した対数ひずみ (=  $\ln(1+\varepsilon)$ )

$\sigma_y$  : 降伏応力

$E$  : ヤング率

である。この曲線は材料の真応力-対数ひずみ曲線があれば、決定することができる。

$K_{mat}$  は、R6法の材料カテゴリーごとに、表 A2.14.1 に示すように取り扱う。

表 A2.14.1 各カテゴリーごとの  $K_{mat}$

カテゴリー	$K_{mat}$
1	$K_{Ic}$ 、 $K_c$ 、 $K_{0.2}$
2	$K_{\Omega}(\Delta a_j)$ (最大値は $K_g$ )
3	$K_{\Omega}(\Delta a_j)$

ここで、 $K_{Ic}$ 、 $K_c$ は線形弾性条件における破壊靱性値であり、 $K_{0.2}$ 、 $K_g$ 、 $K_{\Omega}(\Delta a_j)$ は  $J$  積分の値を用いて算出することができるパラメータである。

#### A2.14.2 $L_r$ の評価手法

$L_r$  の算出には、端部ピン支持と端部固定支持の 2 つの仮定に基づいた評価式を用いることができる。Willoughby<sup>21)</sup>らは実験データとの比較から、端部ピン支持は過大の安全側の評価となり、端部固定支持はより合理的な評価を与えることができるとしている。

##### (1) 両端ピン支持で拘束した場合

両端ピン支持で拘束した場合は、柴田ら<sup>22)</sup>の評価式を使用する。

$$L_r = 2 \left( \frac{\sigma_m^2}{\sigma_y} \right) / \left[ -A + \left\{ A^2 + 4 \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^2 \sigma_m^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.14.7)$$

ただし、

$$A = (2\sigma_b/3) + (2a\sigma_m/W) \quad (2.14.8)$$

$\sigma_m$  : 膜応力

$\sigma_b$  : 曲げ応力

$W$  : 肉厚

である。また、半楕円き裂を対象とする場合は、き裂の深さを以下の等価深さ  $a_{eff}$  に置き換える。

$$a_{eff} = \frac{\pi ab}{4b + 2W} \quad (2.14.9)$$

ただし、 $b$  はき裂半長である。

##### (2) 両端固定支持で拘束した場合

両端固定支持で拘束した場合は Willoughby ら<sup>21)</sup>の評価式を用いる。

$$L_r = 2 \left( \frac{\sigma_m^2}{\sigma_y} \right) / \left[ -A + \left\{ A^2 + 4 \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^2 \sigma_m^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.14.10)$$

ただし、

$$A = 2\sigma_b/3 \quad (2.14.11)$$

である。

すなわち、拘束条件の違いは主にパラメータ  $A$  に現れている。

### A2.14.3 Kr の評価方式

R6 法におけるパラメータ  $K_r$  は、1 次応力を用いて得られるパラメータ  $K_r^P$  および 2 次応力を用いて得られるパラメータ  $K_r^S$  を用いて、次式より算出される。

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{mat}} + \left\{ \frac{K_I^S}{K_{mat}} + \rho \right\} = K_r^P + K_r^S \quad (2.14.12)$$

ここで、1 次応力とは内圧によって発生する応力であり、PASCAL では入力された各時刻における内圧のデータから理論式を用いて算出する。また、2 次応力とは熱によって発生する応力であり、PASCAL では入力された各時刻の応力成分（全応力）から内圧によって発生する応力成分（1 次応力）を引いて算出する。

一方、R6 法を適用する場合は、本コードが取り扱える応力分布時刻歴の形式として、膜・曲げ形式と 3 次多項式形式の 2 つである。従って、内圧から計算された応力に対して、入力データの形式に従って、膜・曲げ形式か 3 次多項式形式かに変換する必要がある。

内圧によって発生する応力の算出式を以下に示す。

軸方向き裂の場合：

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \frac{P}{r^2} + \frac{a^2}{b^2 - a^2} P \quad (2.14.13)$$

周方向き裂の場合：

$$\sigma_z = \frac{a}{2(b-a)} P \quad (2.14.14)$$

ただし、

- $a$  : 容器内半径
- $b$  : 容器外半径
- $P$  : 内圧
- $r$  : 容器の中心からの距離

である。

軸方向応力は位置の関数ではないため、膜・曲げ形式か 3 次多項式形式かに変換する必要があるのは、周方向応力だけである。変換手法は最小 2 乗法を用いている。

### A2.14.4 R6 法カテゴリ 3 解析に対する標準 J-R 曲線の設定と解析標準化

R6 法カテゴリ 3 基準による解析を行う場合、亀裂先端の照射量と温度に対応する J-R 曲線が必用である。この J-R 曲線は、データテーブルにより与えることができるが、この入力データの作成は極めて困難である。そのため、既存の公表された照射材の破壊靱性データを利用し、照射材の J- $\Delta a$  曲線の平均値、標準偏差、カテゴリ一切替え温度等について下記の 2 種類の標準曲線を設定している。

#### (1) 国内データに基づく標準 J- $\Delta a$ 曲線の設定

ここで、J-R 曲線を上部靱性値の低下から評価する富松の手法<sup>23)</sup>について説明する。この手法では、上部靱性値の低下を次式により評価する。

母材の場合：

$$\Delta USE = \frac{UUS}{100} (2.40 + 102.6 \cdot Cu) \cdot f^{0.297 - 0.145 \log f} \quad (2.14.15)$$

溶接部の場合：

$$\Delta USE = \frac{UUS}{100} (7.20 + 97.0 \cdot Cu) \cdot f^{0.140} \quad (2.14.16)$$

ただし、

- $\Delta USE$  : 上部棚エネルギーの低下量 (J)
- $UUS$  : 初期上部棚エネルギー (J)
- $Cu$  : 銅の含有率 (wt%)
- $f$  : フルエンス ( $\times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> E>1MeV)

である。

母材について、上部棚靱性値の低下の 1 例を図 A2.14.2 に示す。ただし、初期上部棚エネルギーを 191 (J)、Cu 含有率を 0.09 %としている。

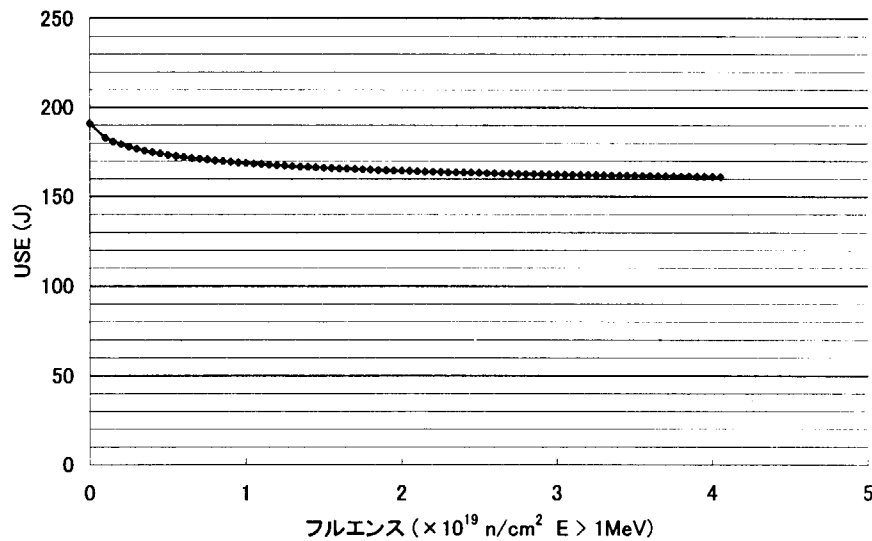


図 A2.14.2 上部棚エネルギーの低下予測量

上部棚靱性値の低下量から次式を用いて J-R 曲線を評価する。

$$J = C(\Delta a)^m \quad (2.14.17)$$

このなかで、

- 母材の場合 :  $C = -4.94 \times 10^{-4} \cdot USE \cdot T - 0.375 \cdot T + 2.624 \cdot USE + 53.0$
- :  $m = -1.59 \times 10^{-6} \cdot USE \cdot T - 9.96 \times 10^{-5} \cdot T + 1.83 \times 10^{-3} \cdot USE + 0.273$
- 溶接部の場合 :  $C = -8.74 \times 10^{-4} \cdot USE \cdot T - 0.372 \cdot T + 2.210 \cdot USE + 73.5$
- :  $m = -1.46 \times 10^{-6} \cdot USE \cdot T + 1.04 \times 10^{-4} \cdot T + 1.36 \times 10^{-3} \cdot USE + 0.315$

また、 $J$  は J 積分値 (KJ/m<sup>2</sup>)、 $\Delta a$  はき裂進展量 (mm) である。

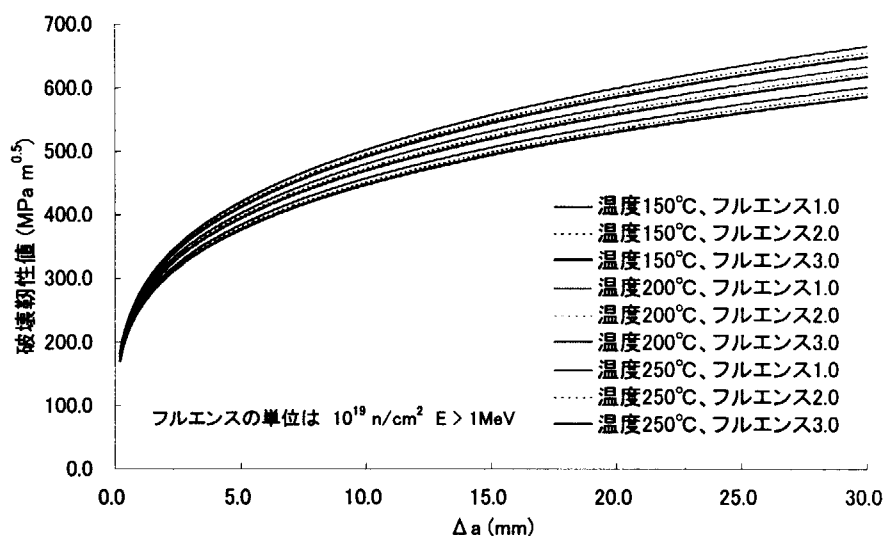
破壊靱性値は以下の関係式から算出できる。



$$K_{Ic} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} J(\Delta a) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.14.18)$$

以上の計算式を用いた破壊靱性と  $\Delta a$  の関係の 1 例を図 A2.14.3 に示す。図中では、初期上部棚エネルギーを 191(J)、Cu 含有率を 0.09 %、ヤング率を  $2.0 \times 10^5$  MPa、ポアソン比を 0.3 としている。

図 A2.14.3 から、初期の段階では  $\Delta a$  の増加に伴って破壊靱性値は急速に増加するが、 $\Delta a$  がある程度大きくなるとその増加傾向は徐々にゆるやかになることが分かる。そのため、PASCAL ではの  $\Delta a$  の限界値をユーザによって入力し、この限界値を超えた破壊靱性値を一定値としている。



図A2.14.3 破壊靱性値と  $\Delta a$  の関係

(2) 米国データに基づく標準 J- $\Delta a$  曲線

E.D.Eason ら<sup>28)</sup>は表 A2.14.1 に示す大量の試験片について実験データを分析し、非線形統計処理により RPV 溶接部、RPV 母材、配管溶接部及び配管母材の J- $\Delta a$  曲線を作成している。

表 A2.14.1 J- $\Delta a$  モデルを設定するための試験片数

	照射材	非照射材	試験片総数
RPV 溶接部	1 1 9	1 9 8	3 1 7
RPV 母材	2 5	1 1 9	1 4 4
配管溶接部		2 2	2 2
配管母材		7 1	7 1
合 計	1 4 4	4 1 0	5 5 4

このうち、RPV 母材の材質は A508 と A533B であり、 $J$ - $\Delta a$  曲線を確立する際は温度、Cu の含有率、照射前シャルピーインパクトエネルギー CVN<sub>p</sub>、中性子照射量 ( $\phi t$ ) 及びき裂の進展量を考慮している。

$J$  積分に関しては、変形  $J$  積分 ( $J_d$ ) 及び修正  $J$  積分 ( $J_m$ ) の 2 つ形式で評価している。また、各評価形式に関しては、Charpy model、Cu- $\phi t$  model、CVN<sub>p</sub> model の 3 つのモデルで評価したが、CVN<sub>p</sub> model が最も予測精度が高いことが確認されている。そこで、CVN<sub>p</sub> model により標準 J-R 曲線を設定した。

#### ・ RPV 溶接部の評価モデル

E.D.Eason らが RPV 溶接部について、4152 点の実験データから統計処理により  $J$ - $\Delta a$  評価モデルを求め、変形  $J$  積分 ( $J_d$ ) の  $J$ - $\Delta a$  曲線は以下のように得られている。

$$J_d = C_1 (\Delta a)^{C_2} \exp[C_3 (\Delta a)^{C_4}] \quad (\text{A2.4.19})$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_1 &= \exp[-4.10 - 0.710Cu(\phi_t)^{0.388} - 0.00269T + 0.123 \ln(B_n) + 1.50 \ln(CVN_p)] \\ C_2 &= 0.0770 + 0.116 \ln(C_1) - 0.102 \ln(B_n) \\ C_3 &= -0.0812 - 0.00920 \ln(C_1) - 0.0732 \ln(B_n) \\ C_4 &= -0.483 \end{aligned} \quad (\text{A2.4.20})$$

また、 $T$  は温度 ( $^{\circ}F$ )、 $Cu$  は銅の含有率 (wt%)、 $B_n$  は試験片肉厚 (in)、 $\phi_t$  は中性子照射量 ( $10^{18} \text{n/cm}^2$ )、 $CVN_p$  は照射前シャルピーインパクトエネルギー (ft-lb) で、また  $J$  積分の単位は  $\text{kip-in/in}^2$  である。

修正  $J$  積分 ( $J_m$ ) の  $J$ - $\Delta a$  曲線は以下のように得られている。

$$J_m = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (\text{A2.4.21})$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_1 &= \exp[-2.92 - 1.03Cu(\phi_t)^{0.353} - 0.00234T + 1.28 \ln(CVN_p)] \\ C_2 &= 0.363 + 0.0725 \ln(C_1) - 0.115Cu(\phi_t)^{0.353} \end{aligned} \quad (\text{A2.4.22})$$

である。

#### (2) RPV 母材の評価モデル

母材について、2295 点の実験データから  $J$ - $\Delta a$  曲線を求めており、変形  $J$  積分 ( $J_d$ ) に関して以下のように表せる。

$$J_d = C_1 (\Delta a)^{C_2} \exp[C_3 (\Delta a)^{C_4}] \quad (\text{A2.4.23})$$

ただし、

$$\begin{aligned}
C_1 &= \exp[-2.53 + 1.15 \ln(CVN_p) - 0.00270T + 0.0760 \ln(B_n) - 0.0104\phi_t] \\
C_2 &= 0.0770 + 0.116 \ln(C_1) - 0.0367 \ln(B_n) \\
C_3 &= -0.0812 - 0.00920 \ln(C_1) - 0.0263 \ln(B_n) \\
C_4 &= -0.408
\end{aligned}
\tag{A2.4.24}$$

である。

修正 J 積分 ( $J_m$ ) の J- $\Delta a$  曲線は以下のように表せる。

$$J_m = C_1 (\Delta a)^{C_2} \tag{A2.4.25}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
C_1 &= \exp[-0.0945 + 0.686 \ln(CVN_p) - 0.00258T - 0.0109\phi_t] \\
C_2 &= 0.678 + 0.120 \ln(C_1) - 0.0944 \ln(CVN_p)
\end{aligned}
\tag{A2.4.26}$$

である。

以上の評価式のうち、適用範囲の広さから修正 J 積分 ( $J_m$ ) の J- $\Delta a$  曲線を用いることとし、これを PASCAL に取り入れた。このうち、溶接部に関する評価式 (A2.4.21) の標準偏差は 0.187、母材に関する評価式 (A2.4.25) の標準偏差は 0.145 である。また、上記評価式の影響因子の標準値を以下のように設定されている。

$$CVN_p = 100 \text{ ft-lbs} = 135.58 \text{ J}$$

$$Cu = 0.20\%$$

$$T = 390 \text{ } ^\circ\text{F} = 198.89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$B_n = 0.8 \text{ in} = 20.32 \text{ mm}$$

ここで、式 (A2.4.3) 及び式 (A2.4.4) に示す溶接部に関する評価モデルを日本国内評価式<sup>28)</sup>と比較した。計算条件を日本国内データの標準条件とした。すなわち、

$$CVN_p = 191 \text{ J}$$

$$Cu = 0.09\%$$

である。

J から  $K_{\Omega}$  の換算は以下の式を適用している。

$$K_{\Omega} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} J(\Delta a) \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{A2.4.27}$$

ここで、

$$E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

としている。

150°Cにおける国内データによる評価式と米国データによる評価式の比較を図 A2.14.4、250°Cの比較を図 A2.14.5 に示す。同じ計算条件を用いても、破壊靱性の値が異なることが分かる。

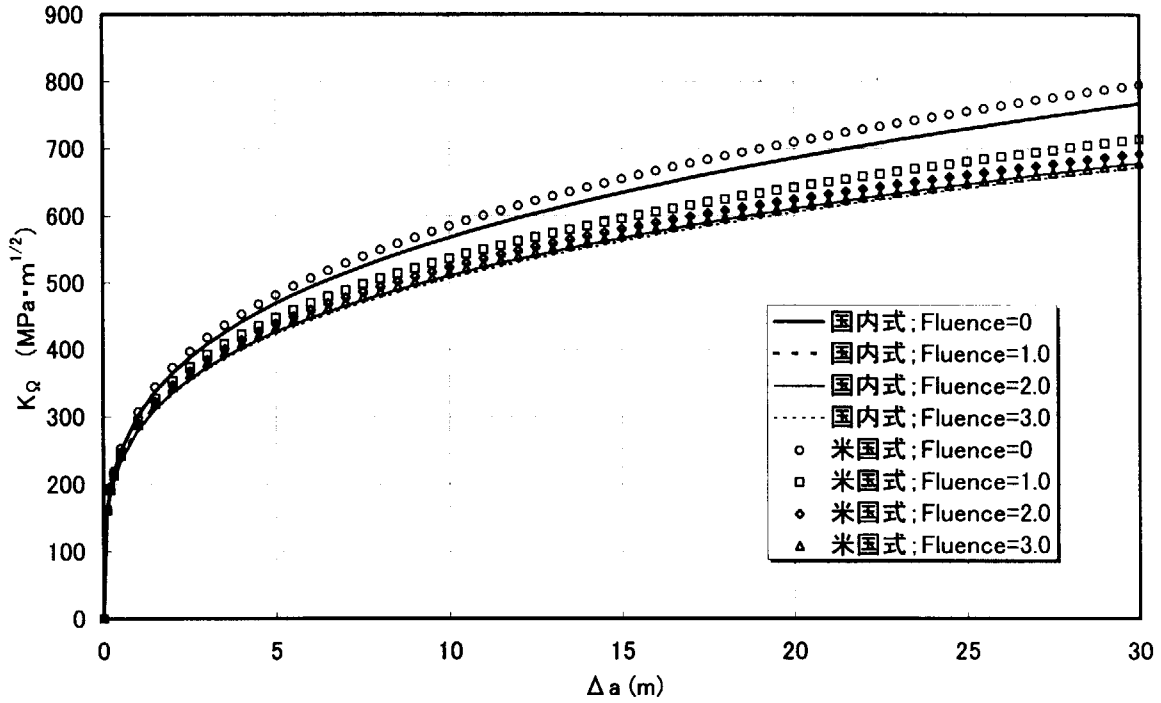


図 A2.14.4 150°Cにおける日本国内評価式と米国の評価式の比較

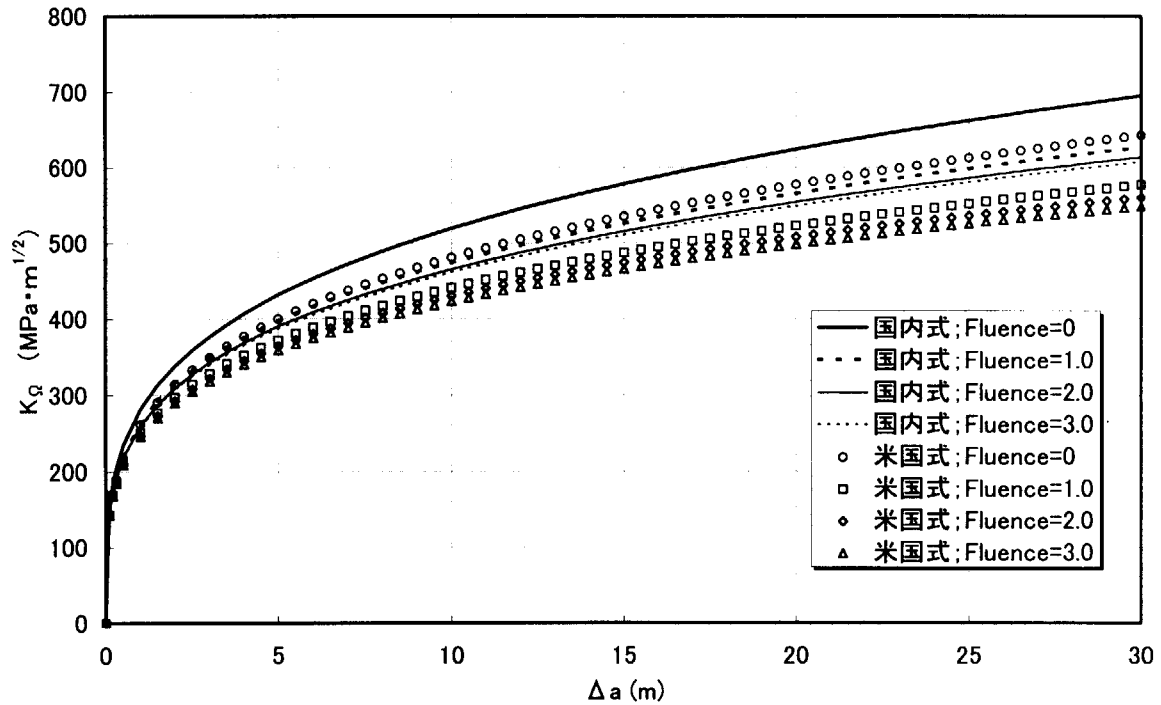


図 A2.14.5 250°Cにおける日本国内評価式と米国の評価式の比較

(3)解析例

NRC/EPRI ベンチマーク解析の A5 問題の解析条件を用いて破壊基準及び J-R 曲線の違いに関する比較を行った。評価対象を溶接部とし、米国の J- $\Delta a$  曲線の標準偏差を 0.187、評価式の影

響因子  $CVN_p$  を標準値の 135.58J とした。また、日本国内の評価式との比較計算も行い、国内の

$K_Q - \Delta a$  曲線の標準偏差を 0.1、評価式の初期上部棚エネルギー  $UUS$  を標準値の 191J とした。

計算は、これまでの知見に踏まえき裂進展刻みを 0.1mm、時間刻みを 1.0min、偏差再計算方式を FAVOR 方式、 $K_{Ic} - K_{Ia}$  偏差の相関係数を 1.0 とした。また、 $J - \Delta a$  曲線の評価モデルについては、 $\Delta a$  が 30mm よりも大きい場合の  $J$  の値を全て 30mm のときの値とした。

解析結果を表 A2.14.2 及び表 A2.14.3 及び図 A2.14.6、図 A2.14.7 に示す。

き裂進展確率に関する解析結果では、R6 法の各種カテゴリによるき裂進展確率は全体的に  $K_{Ic} - K_{Ia}$  破壊基準によるき裂進展確率より高い。これは、R6 法を用いる場合は  $K_r$  パラメータには 2 次応力に対する補正係数が入っていることと、R6 法の破壊曲線が塑性崩壊パラメータ  $L_r$  によって低下することによるものである。また、R6 法を用いる場合は、カテゴリ 1 のみを用いるよりも、カテゴリ 1,3 を用いる場合がき裂進展確率が高い。これは今回の解析条件ではカテゴリ 3 を用いる場合の破壊靱性が高温域でカテゴリ 1 の破壊靱性よりも低いことによるものである。過渡事象の初期の 20 分でのカテゴリ 1 の破壊靱性  $K_{Ic}$  とカテゴリ 3 の破壊靱性  $K_{0.2}$  の比較を図 A2.4.8 に示す。

さらに、カテゴリ 1,3 を用いる場合でも、米国の評価式を用いる場合のき裂進展確率は国内評価式を用いる場合のき裂進展確率より高いことが確認できる。これは、国内評価式による破壊靱性  $K_{0.2}$  が米国評価式による破壊靱性  $K_{0.2}$  より低いことによるものである。

破壊確率に関しては、R6 法のカテゴリ 1 のみを用いる場合は  $K_{Ic} - K_{Ia}$  破壊基準よりも高い破壊確率を示しており、これはき裂進展確率の場合と同じ理由による。一方、カテゴリ 1,3 を用いる場合は破壊確率が著しく低減されていることが確認できる。これは亀裂進展にともない破壊抵抗  $J - \Delta a$  曲線の増大する効果が解析に反映されるためである。

表 A2.14.2 A5 問題のき裂進展確率

フルエンス ( $\times 10^{19}n/cm^2$ )	き裂進展確率			
	$K_{Ic} - K_{Ia}$ 破壊基準	カテゴリ 1 のみ	カテゴリ 1, 3 国内評価式	カテゴリ 1, 3 米国評価式
0.5	3.196E-2	5.402E-2	5.900E-2	6.088E-2
1.0	1.736E-1	2.343E-1	2.361E-1	2.364E-1
2.0	3.452E-1	4.129E-1	4.148E-1	4.156E-1
3.0	4.250E-1	4.964E-1	4.941E-1	4.946E-1

表 A2.14.3 A5 問題の破壊確率

フルエンス ( $\times 10^{19}n/cm^2$ )	破壊確率			
	$K_{Ic} - K_{Ia}$ 破壊基準	カテゴリ 1 のみ	カテゴリ 1, 3 国内評価式	カテゴリ 1, 3 米国評価式
0.5	3.195E-2	5.401E-2	1.000E-7	2.600E-6
1.0	1.736E-1	2.342E-1	2.330E-5	7.897E-4
2.0	3.452E-1	4.128E-1	4.840E-3	4.855E-2
3.0	4.250E-1	4.964E-1	3.866E-2	1.813E-1

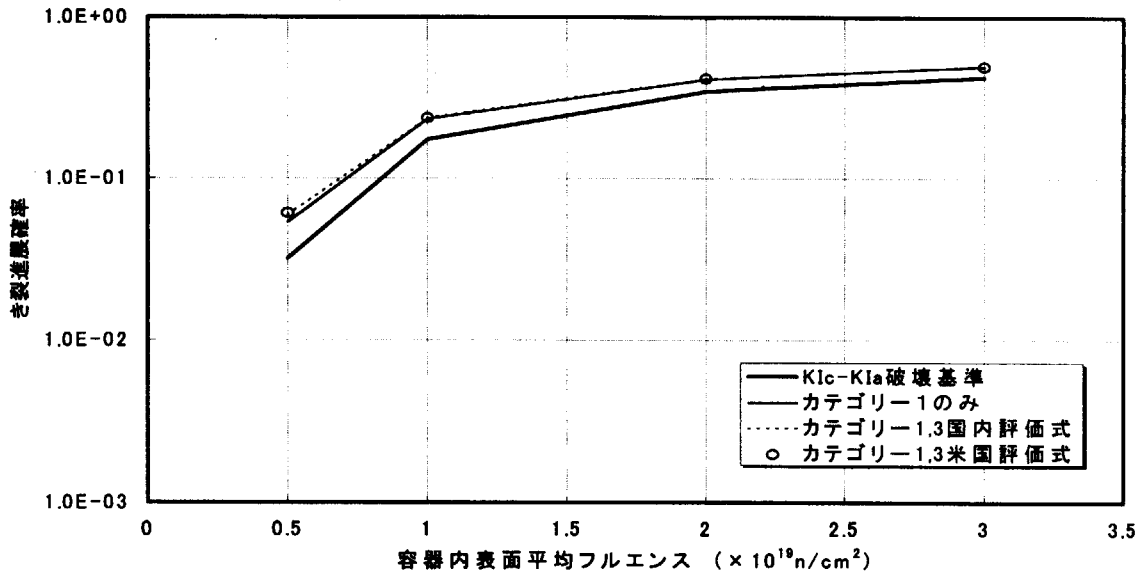


図 A2.14.6 A5問題のき裂進展確率

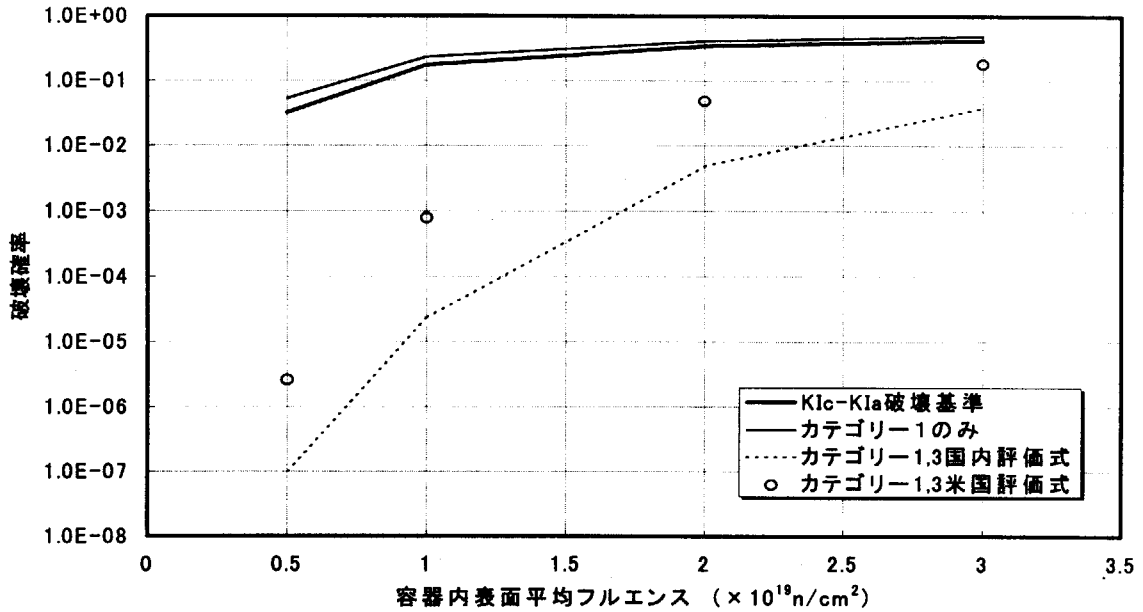


図 A2.14.7 A5問題の破壊確率

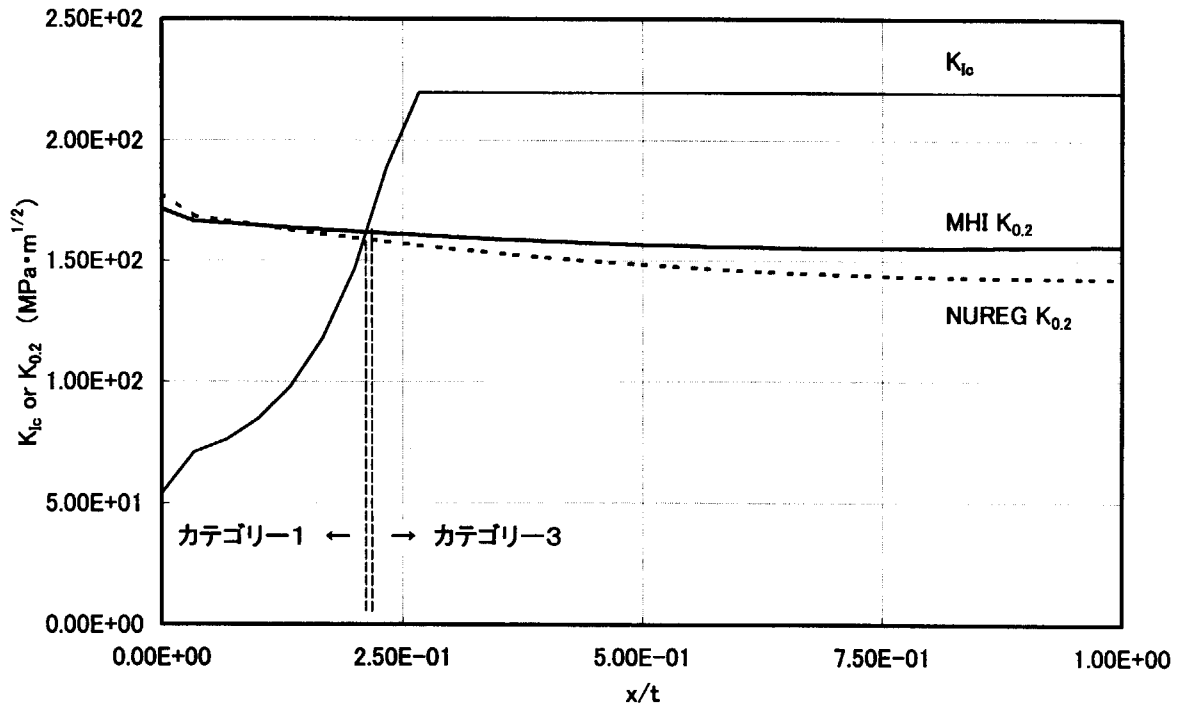


図 A2.14.8 R6 法を用いる場合の各解析ケース  $K_{0.2}$  及び  $K_{Ic}$  の比較 (20 分)

#### A2.14.5 カテゴリー1とカテゴリー3の切り替えについて

解析カテゴリーは、ユーザがカテゴリー1, 2, 3の中から選択するか、破壊モードに応じてカテゴリー1, 2または1, 3から自動選択される。自動選択時の破壊モードは $T - RT_{NDT}$ により決定され、 $T - RT_{NDT}$ が入力値よりも小さい場合はカテゴリー1を使用し、 $T - RT_{NDT}$ が入力値よりも大きい場合はカテゴリー2または3を使用する。

カテゴリーの自動切り替えに伴う $K_{mat}$ の評価手法の1例を図A2.14.9に示す。

き裂の進展開始直後は、容器内表面付近の温度の低い部分にき裂が位置しているため、 $T$ は低い。また中性子照射量が多いため、 $RT_{NDT}$ は高めである。よって $T - RT_{NDT}$ は小さい可能性が高い。入力されたしきい値よりも小さくなった場合は、カテゴリー1が選択される。

き裂が進展していくにつれて、き裂先端の温度は上昇し、中性子照射量は減衰するため $T - RT_{NDT}$ は次第に高くなることが考えられる。 $T - RT_{NDT}$ が入力されたしきい値よりも高くなると、カテゴリーは2または3に切り替えられる。

その後の $K_{mat}$ の値は $K_{\Omega}(\Delta a_j)$ または $K_g$ から算出されるが、ここでの $\Delta a_j$ はき裂の全進展量ではなく、カテゴリーが2または3に切り替えた後のき裂進展量であることに注意されたい。

カテゴリー2または3において、き裂が進展するにつれて $K_{mat}$ は増加していく。 $K_{mat}$ の増加が $K_r$ の増加よりも大きい場合は、 $K_r$ は基本的に減少する。 $K_r$ の減少が大きい場合は、き裂進展が停止することもある。

き裂進展停止中は、時刻の経過によって温度が低下していくことが考えられる。そのため $K_{mat}$ は減少していく。 $K_r$ が増加するなら、き裂が再進展することもある。き裂が再進展するかどうかの判定には、カテゴリー切り替えの前の $K_{mat}$ が使用される。

き裂の再進展が始まった後、 $T - RT_{NDT}$ の値によってカテゴリーが1になる場合と2または3になる場合がある。カテゴリーが2または3になる場合は、 $K_{mat}$ の値に $K_{\Omega}(\Delta a_j)$ または $K_g$ を使用し、カテゴリーが1になる場合は、 $K_{mat}$ の値に $K_c$ 、 $K_{0.2}$ のいずれかを使用する。

再進展後のカテゴリーが1の場合は、き裂がさらに進展するとカテゴリーが2または3に切り替わる可能性がある。 $T - RT_{NDT}$ の値がしきい値を上回ってカテゴリーが切り替わった場合、 $K_{mat}$ を決定するための $\Delta a_j$ はカテゴリーが切り替わった位置を0.0として再計算される。

R6法によるき裂進展・破壊評価の1例を図A2.14.10に示す。



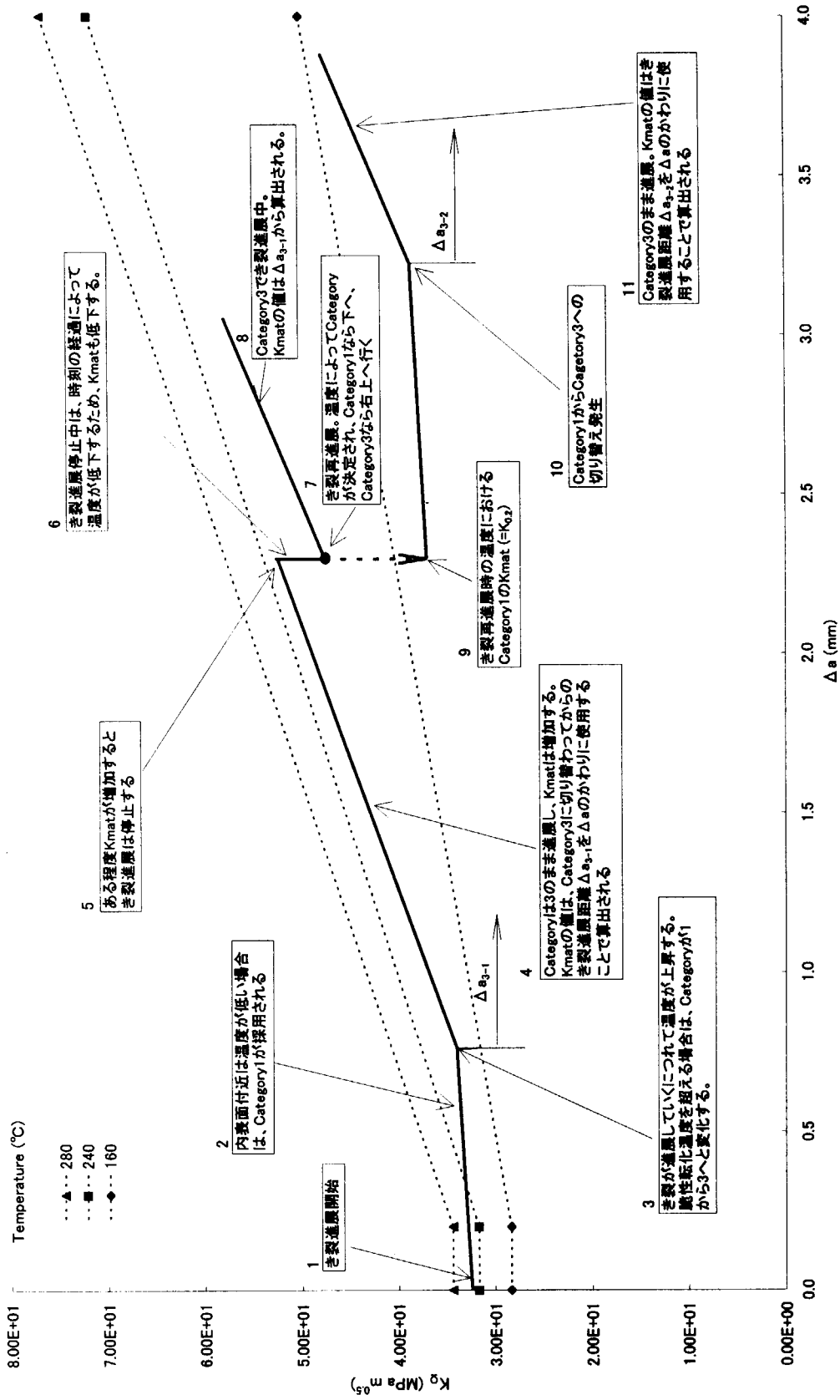


図 A2.14.9 カテゴリー1、3 切り替え時の  $K_{mat}$  の値の1例

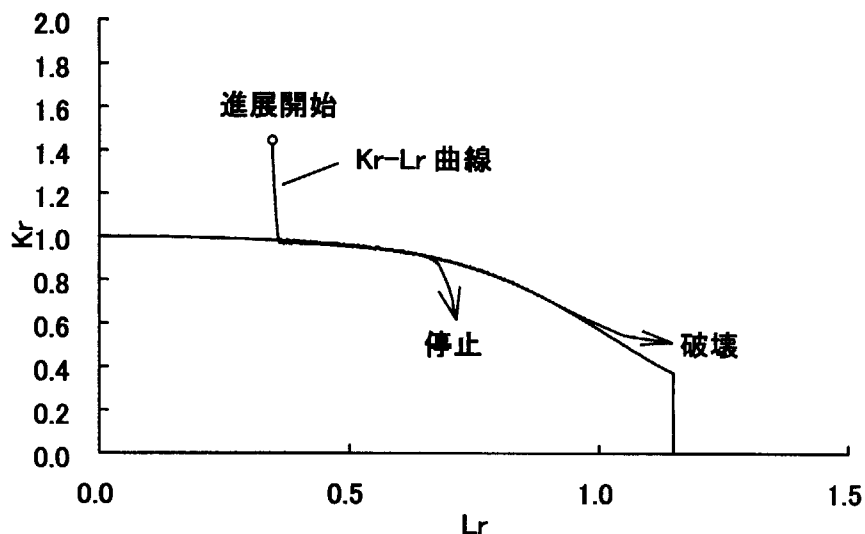


図 A2.14.10 R6法を用いた評価例

#### A2.15 き裂進展刻みの計算方式

き裂進展が開始する場合、ユーザ入力したき裂進展刻みに従って進展し、き裂の寸法を増分計算していく。き裂進展刻みが小さければ計算精度が高いが、計算時間がかかる。これに対して、PASCALは以下の2種類の進展計算方式を用意している。

- ・等間隔進展方式
- ・等比級数進展方式

##### (1) 等間隔進展方式

き裂は等間隔進展方式に従って進展する場合は、き裂の進展刻みはユーザによって入力する必要がある。き裂が進展していくたびにこの進展量を加算し新たなき裂寸法を計算していく。

##### (2) 等比級数進展方式

き裂は等比級数進展方式に従って進展する場合は、き裂の初期進展刻みと等比級数の増幅率はユーザによって入力する必要がある。き裂が進展していくたびに等比級数に従って、新たな進展量を計算しき裂の寸法を加算していく。

## A2.16 非破壊検査

PASCAL は非破壊検査を考慮する場合、非破壊検査によるき裂非検出確率に従って、き裂が検出されるかどうかの判定を行う。非破壊検査によるき裂非検出確率に関しては、以下の5つのモデルを考慮することができる。

- ・ VISA-II モデル
- ・ 体積検査に関する PISC モデル
- ・ 体積検査に関する改良 PISC モデル
- ・ LLNL モデル
- ・ 荒川モデル

### A2.16.1 VISA-II モデル

VISA-II の表面き裂の検査モデル<sup>4)</sup>を図 A2.16.1 に示すように説明できる。

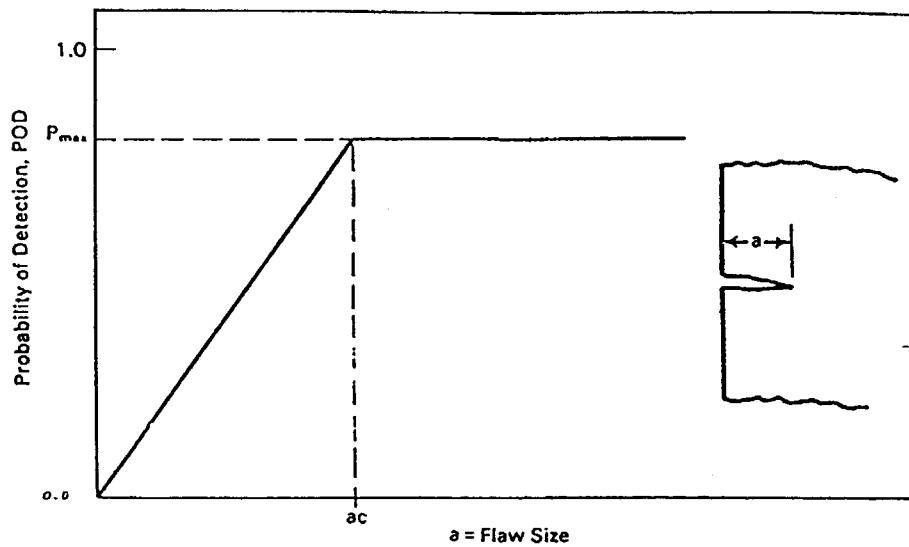


図 A2.16.1 VISA-II き裂検出確率モデル

き裂の深さは一定の値( $a_c$ )より大きくなると、き裂の検出確率(POD)は一定値( $P_{max}$ )とみなせる。き裂の深さはこの  $a_c$  より小さい場合は、検出確率はき裂の深さに比例して減少していく。 $P_{max}$  と  $a_c$  の値は被検査材料の表面粗さによって決定される。一般的には、表面が粗いほど、 $P_{max}$  が小さく、 $a_c$  が大きい。滑らかなクラッド付き容器の場合 (Best Condition) は、 $P_{max}$  はおよそ 95%、 $a_c$  はおよそ 0.25in とされている<sup>4)</sup>。これに対して、溶接表面または研磨されていない表面の場合 (Worst Condition) は、

$P_{max}$  はおよそ 75%、 $ac$  はおよそ 1.0in とされている<sup>4)</sup>。

### A2.16.2 体積検査の PISC モデル及び改良 PISC モデル

体積検査に関する評価モデル<sup>4)</sup>は PISC (Plate Inspection Steering Committee) の検出確率に関する研究成果およびその改良モデルに基づいたものである。これらのモデルを図 A2.16.2 に示す。PASCAL ではこれらの曲線の値を取り込んで使用している。

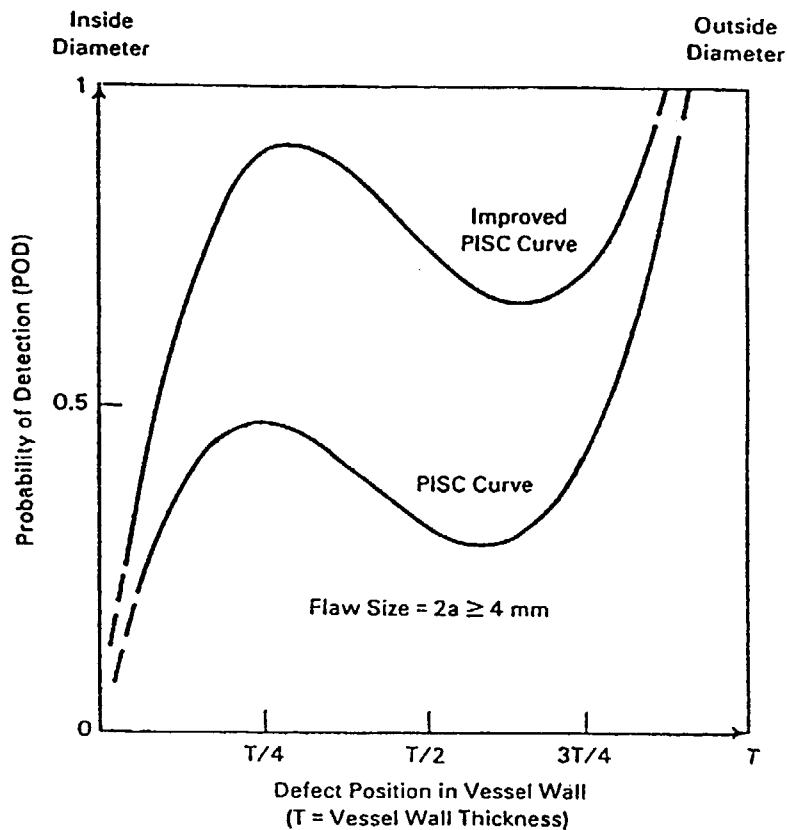


図 A2.16.2 体積検査の PSIC モデル及び改良 PISC モデル

### A2.16.3 LLNL のモデル

LLNL 研究所の非破壊検査に関するき裂非検出確率モデル<sup>24)</sup>を次式に示す。

$$P_{ND} = \frac{1}{2}(1-\varepsilon) \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\ln(A/A')}} e^{-t^2} dt \right) + \varepsilon \quad (2.16.1)$$

$$A = \begin{cases} \frac{\pi}{2} ac & (2c \leq D_B) \\ \frac{\pi}{4} aD_B & (2c > D_B) \end{cases} \quad (2.16.2)$$

ここで、

$$A^* = \frac{\pi}{4} a^* D_B \tag{2.16.3}$$

$D_B$  = 超音波ビーム径 = 25.4mm

である。また、 $a$  はき裂の深さ、 $c$  はき裂半長である。

式中の  $\nu$ 、 $a^*$  及び  $\epsilon$  は材料、検査チームの熟練度などに関連するパラメータである。以下の値は Harris らによって与えられた 1 例である。この場合のき裂非検出確率を図 A2.16.3 に示す。

$$\nu = 1.60$$

$$a^* = 6.35\text{mm}$$

$$\epsilon = 0.005$$

一方、最近、Simonen と Khaleel らは原子力配管系について、材料及び非破壊検査チームの熟練度を考慮し、式中の各パラメータの値を提案している。これを表 A2.16.1 に示す。表中の  $h$  は配管の肉厚で、“優秀、良好、下限”は ASME Appendix III のパフォーマンステストによって分類されている。

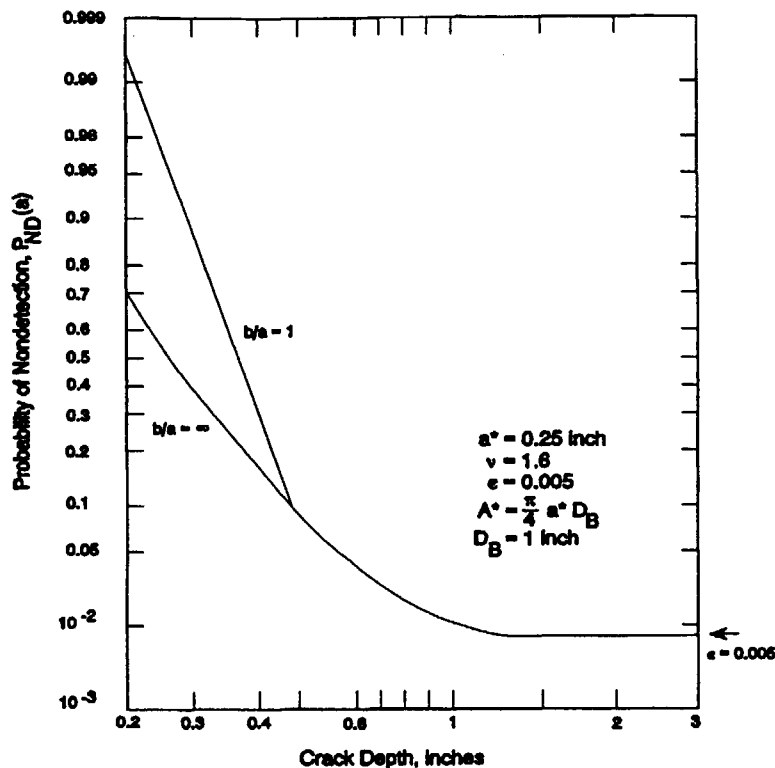


図 A2.16.3 LLNL き裂非検出確率の 1 例

表 A2.16.1 LLNL き裂非検出確率モデルに関するパラメータ

検査チーム熟練度		炭素鋼	ステンレス鋼	
		疲労き裂	疲労き裂	応力腐食割れ
優秀 (outstanding)	$a^*$	0.05h	0.05h	0.05h
	$v$	1.6	1.6	1.6
	$D_B$	1.0 in.	1.0 in.	1.0 in.
	$\epsilon$	0.005	0.005	0.005
良好 (good)	$a^*$	0.15h	0.15h	0.4h
	$v$	1.6	1.6	1.6
	$D_B$	1.0 in.	1.0 in.	1.0 in.
	$\epsilon$	0.02	0.02	0.10
下限 (marginal)	$a^*$	0.4h	0.4h	0.65h
	$v$	1.6	1.6	1.6
	$D_B$	1.0 in.	1.0 in.	1.0 in.
	$\epsilon$	0.10	0.10	0.25

#### A2.16.4 荒川モデル

荒川のき裂検出確率モデル<sup>25)</sup>は多くの実データに裏付けられたものとされており、国内の複数の研究がその使用を推奨している。き裂検出確率のモデルを以下に示す。

$$P = \int_{X_0-l}^{\infty} R(x) dx - \frac{X_0}{l} \int_{X_0-l}^{X_0} R(x) dx - \frac{\sigma}{l\sqrt{2\pi}} \left[ \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \right]_{X_0-l}^{X_0} \quad (2.16.4)$$

$$X_0 = (l + L_0) - 20 \log \left( \frac{2w\sqrt{\sin \theta}}{\sqrt{\lambda t_H}} \right) - (20 \log Ec)_{ave} \quad (2.16.5)$$

ここで、

- $P$  : 欠陥検出確率
- $w$  : 欠陥深さ (mm)
- $l$  : 探傷ごとに定まる定数 (dB)
- $L_0$  : 検出レベル (dB)
- $\theta$  : タンデム探傷に用いた探触子の屈折角 (度)
- $\lambda$  : 超音波の波長 (mm)
- $t_H$  : 対比傷の横穴の径 (mm)
- $(20 \log Ec)_{ave}$  : 平滑面と割れ面のエコー高さの差の平均値 (dB)
- $R(x)$  : 正規確率密度関数 (平均値は 0dB)
- $\sigma$  : 正規確率分布の標準偏差 (dB)

である。圧力容器を対象とする場合、上記の定数の典型的な値は以下の通りである。

- $l$  : 10 dB
- $L_0$  : -14 dB

$\theta$  : 45 度  
 $\lambda$  : 1.615 mm  
 $l_H$  : 7.9 mm  
 $(20 \log Ec)_{ave}$  : -7.5 dB  
 $\sigma$  : 2.67 dB

パラメータ  $l$  は表面欠陥に対する値であり、内在欠陥の場合は 16dB が一般的な値として用いられる。式(2.6.4)に対して、き裂非検出確率が以下のように算出される。

$$P_{ND} = 1 - P \tag{2.16.6}$$

また、(2.16.4)式右辺第 1 項の無限大までの積分は、正規分布の平均値から無限大までの積分値が 0.5 であることを利用して行うことができる。正規分布の積分値は、級数展開を用いて次式から算出される。

$$\int_0^a R(x) dx = -\left(\frac{x^2}{2 \cdot 1^2 + 1} \cdot \frac{1}{2^1} \cdot \frac{1}{1}\right) + \left(\frac{x^4}{2 \cdot 2^2 + 1} \cdot \frac{1}{2^2} \cdot \frac{1}{1 \cdot 2}\right) - \left(\frac{x^6}{2 \cdot 3^2 + 1} \cdot \frac{1}{2^3} \cdot \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3}\right) + \Lambda \tag{2.16.7}$$

PASCAL では高い精度を確保するため、上式を 30 項目まで計算している。

非破壊検査によるき裂非検出確率の各種モデルに関する比較の 1 例を図 A2.16.4 に示す。

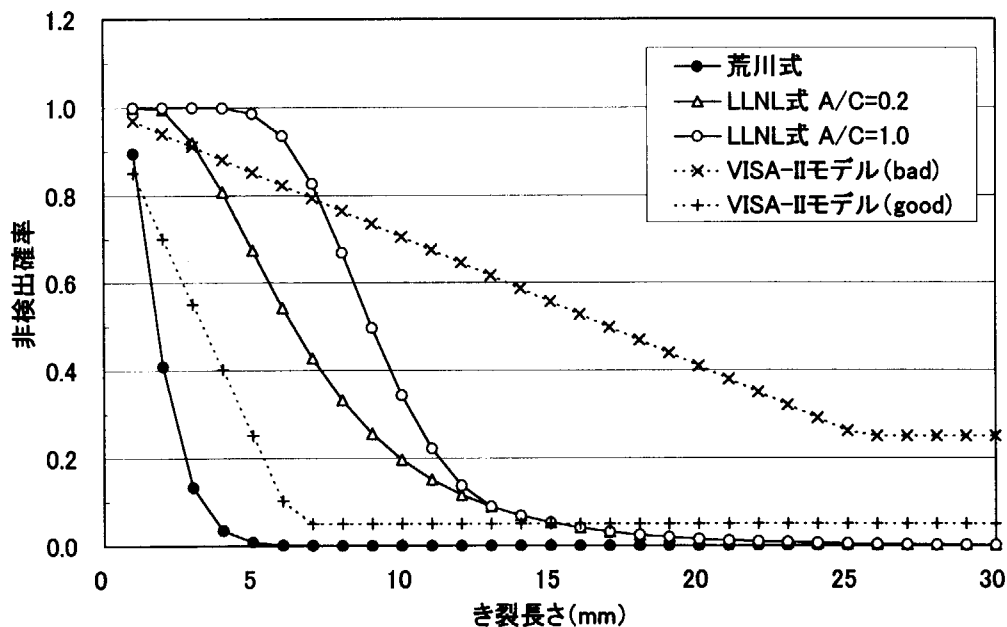


図 A2.16.4 き裂の非検出確率の 1 例

**A2.17 中性子照射による上部靱性値の低下**

米国 RG 1.162<sup>26)</sup>に示されているシャルピー上部靱吸収エネルギーの低下予測式を以下に示す。

$$CvUSE = CvUSE_{(U)} \times [1 - D/100] \tag{2.17.1}$$

ここで、

- $CvUSE$  : 中性子照射を受けた後のシャルピー上部靱吸収エネルギー
- $CvUSE_{(U)}$  : 中性子照射を受ける前のシャルピー上部靱吸収エネルギー
- $D = (100Cu + 9) \cdot f^{0.2368}$  : 母材に対する値
- $D = (100Cu + 14) \cdot f^{0.2368}$  : 溶接部に対する値
- $D = 42.39 \cdot f^{0.1502}$  : 上限値
- $Cu$  : 銅の含有率 (wt%)
- $f$  : フルエンス ( $\times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ )

である。

$D$ については、対象部位に対する式から得られた値と上限値を比較し、小さいものを用いる。

一般的に、シャルピー上部靱吸収エネルギーと  $J$  値の間には比例関係があり、 $J$  値と応力拡大係数の間には  $K \propto \sqrt{J}$  の関係があるため、ここでは、シャルピー上部靱吸収エネルギーの低下率のルートを用いて、上部靱性値の低下量を予測する。よって、用いる式は以下のようになる。

$$UPKIC = UPKIC_{(U)} \times \sqrt{1 - D/100} \tag{2.17.2}$$

ここで、

- $UPKIC$  : 中性子照射を受けた後の上部靱性値
- $UPKIC_{(U)}$  : 中性子照射を受ける前の上部靱性値

である。

この式を用いて、上部靱性値の低下量を試算した結果を図 A2.17.1 に示す。フルエンスが増すことにより、上部靱性値が低下することが確認できる。また、溶接部の方が母材部よりも上部靱性値の低下割合が大きく、フルエンスの比較的小さい段階で低下率の下限値に達している ( $Cu = 0.3 \text{ wt\%}$  の場合)。

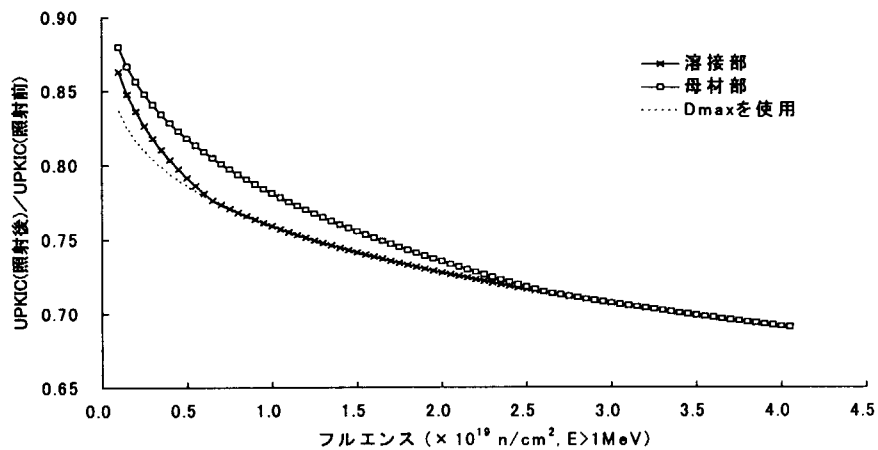


図 A2.17.1 上部靱性値の低下量の予測 ( $Cu = 0.3 \text{ wt\%}$ )



## A2.18 焼鈍および再脆化

焼鈍効果は主に  $\Delta RT_{NDT}$  に対する影響効果と上部靱性値に対する影響効果の 2 つある。これまでの感度解析から、この 2 つ効果のうち、焼鈍による  $\Delta RT_{NDT}$  に対する影響効果は破損確率に与える影響がより大きいことが確認した。

### A2.18.1 $\Delta RT_{NDT}$ に対する回復効果

焼鈍後の  $\Delta RT_{NDT}$  の回復および再脆化の評価流れを図 A2.18.1 に示し、各評価の詳細な手法を以下でまとめる。

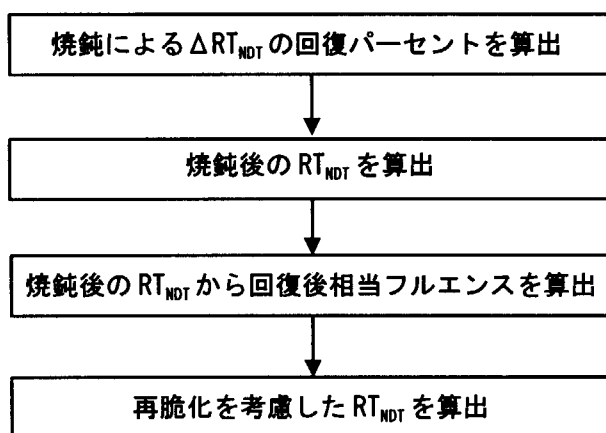


図 A2.18.1 焼鈍による  $\Delta RT_{NDT}$  の回復および再脆化の評価流れ

#### (1) 焼鈍による $\Delta RT_{NDT}$ の回復パーセントの算出

焼鈍による  $\Delta RT_{NDT}$  の回復パーセントは、次式から算出される。

$$R_i = \left[ 0.5 + 0.5 \tanh \left( \frac{a_1 T_a - a_2}{95.7} \right) \right] \times 100 \quad (2.18.1)$$

ただし、

$R_i$  : 焼鈍による  $\Delta RT_{NDT}$  の回復パーセント

$a_1$  :  $= 1 + 0.0151 \ln(t_a) - 0.424 Cu^{(3.28 - 0.00306 T_a)}$

$a_2$  :  $= 0.584(T_i + 637)$        $T_a \geq 800^\circ F$   
 $= 0.584 T_i - 15.5 \ln(\Phi) + 833$        $T_a \leq 750^\circ F$

$T_a$  : 焼鈍温度 ( $^\circ F$ )

$t_a$  : 焼鈍温度に維持されている時間 (hours)

$Cu$  : 銅の含有量 (質量%)

$T_i$  : 照射を受けている間の温度 ( $^\circ F$ )

$\Phi$  : フラックスレート ( $n/cm^2 \cdot s$ )

である。

$T_a$  が  $750^\circ F \sim 800^\circ F$  の間に関しては、現段階では設定されていない。この領域については、RG1.162<sup>26)</sup>で以下のように取り扱うように指定されている。

- ・ 750°F ~ 775°F については、750°F 以下に適用できる式を用いて計算する。
- ・ 750°F ~ 775°F については、(2.18.1)式における 775°F の値と 800°F の値を線形補間して計算する。

(2) 焼鈍後の  $RT_{NDT}$  の算出

$R_t$  を用いて、焼鈍後の  $RT_{NDT}$  は次式のから算出される。

$$RT_{NDT(A)} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} \times (100 - R_t) / 100 \quad (2.18.2)$$

ここで、

$RT_{NDT(A)}$  : 焼鈍後の  $RT_{NDT}$  (°F)

$RT_{NDT(U)}$  : 照射を受けていないときの  $RT_{NDT}$  (°F)

である。

## (3) 回復後相当フルエンスの算出

再照射を受けた後の  $RT_{NDT}$  は、焼鈍前の  $\Delta RT_{NDT}$  算出法と同様の手法で評価する。

焼鈍前の  $\Delta RT_{NDT}$  は、次式を用いて算出することができる<sup>?)</sup>。

$$\Delta RT_{NDT} = (CF)(f)^{(0.28-0.10 \log f)} \quad (2.18.3)$$

$CF$  : 化学的ファクター

$f$  : フルエンス ( $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > 1$  MeV)

再照射を評価するにあたって、水平シフト法を用いるために、次式から「回復後相当フルエンス ( $f_t$ )」を算出する必要がある。

$$RT_{NDT(A)} - RT_{NDT(U)} = (CF)(f_t)^{(0.28-0.10 \log f_t)} \quad (2.18.4)$$

(4) 再脆化を考慮した  $RT_{NDT}$  の算出

次式から再照射を受けた後の  $RT_{NDT}$  を評価する。

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} + M \quad (2.18.5)$$

ここで、

$$\Delta RT_{NDT} : = (CF)(f + f_t)^{[0.28-0.10 \log (f + f_t)]}$$

$$M : = 2\sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_\Delta^2}$$

$f$  : 焼鈍後のフルエンス ( $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > 1$  MeV)

$\sigma_f$  :  $RT_{NDT(U)}$  の偏差

$\sigma_\Delta$  :  $\Delta RT_{NDT}$  の偏差

である。

RG1.162 による焼鈍後の  $RT_{NDT}$  評価手法を模式的に図 A2.18.2 にまとめる。

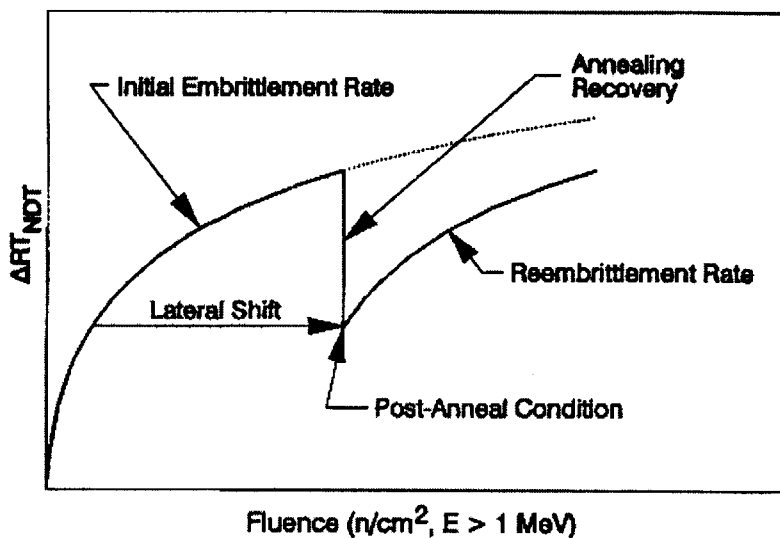


図 A2.18.2 RG1.162 による焼鈍後の  $RT_{NDT}$  評価手法

A2.18.2 上部靱性値に対する回復効果

焼鈍後の上部靱性値の回復および再脆化の評価流れを図 A2.18.3 に示し、各評価手法を以下にまとめる。

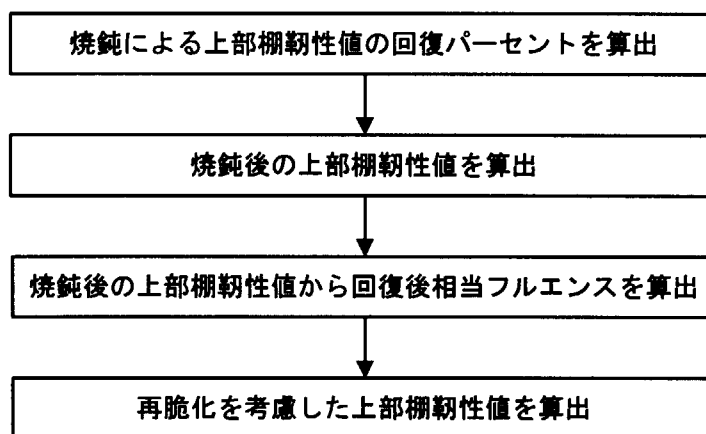


図 A2.18.3 焼鈍による上部靱性値の回復および再脆化の評価流れ

(1) 焼鈍による上部靱性値の回復パーセントの算出

焼鈍によるシャルピー上部靱エネルギーの回復パーセントは、次式<sup>26)</sup>から算出される。

$$R_{USE} = \left\{ \left[ 1 - 0.586 \exp\left(-\frac{t_a}{15.9}\right) \right] \cdot [0.570\Delta USE_i + (0.120T_a - 104)Cu + 0.0389T_a - 17.6] \cdot \left(\frac{100}{\Delta USE_i}\right) \right\} \quad (2.18.6)$$

ここで、

- $R_{USE}$  : 焼鈍による USE の回復パーセント  
 $\Delta USE_i$  : 照射を受けていないときの USE - 照射を受けた後の USE  
 $t_a$  : 焼鈍温度に維持されている時間 (hours)  
 $T_a$  : 焼鈍温度 ( $^{\circ}F$ )  
 $Cu$  : 銅の含有量 (質量%)

である。

### (2) 焼鈍後の上部棚靱性値の算出

$R_{USE}$  を用いて、焼鈍後のシャルピー上部棚吸収エネルギーは次式のから算出される。

$$CvUSE_{(A)} = CvUSE_{(U)} [1 - D \times (100 - R_{USE}) / 10000] \quad (2.18.7)$$

ここで、

- $CvUSE_{(A)}$  : 焼鈍後のシャルピー上部棚エネルギー  
 $CvUSE_{(U)}$  : 照射を受けていないときのシャルピー上部棚エネルギー  
 $D$  : 中性子照射によるシャルピー上部棚エネルギーの減少パーセント

である。

$D$  の算出式は前の節に記している。シャルピー上部棚吸収エネルギーと  $J$  値の間には比例関係があり、 $J$  値と応力拡大係数の間には  $K \propto \sqrt{J}$  の関係があることを考慮したうえで(2.18.7)式を変形し、焼鈍後の上部棚靱性値を算出する式を得る。

$$UPKIC_{(A)} = UPKIC_{(U)} \sqrt{1 - D \times (100 - R_{USE}) / 10000} \quad (2.18.8)$$

ここで、

- $UPKIC_{(A)}$  : 焼鈍を受けた後の上部棚靱性値  
 $UPKIC_{(U)}$  : 中性子照射を受けていない状態のときの上部棚靱性値

である。

### (3) 回復後相当フルエンスの算出

(2.18.8)式に示した中性子照射による上部棚靱性値の低下予測式を用いて、回復後相当フルエンスを算出する。各部位に対する回復後相当フルエンスは次式から得られる。

母材に対しては：

$$f_s = \left[ \frac{100 \left\{ 1 - (UPKIC_{(A)} / UPKIC_{(U)})^2 \right\}}{100Cu + 9} \right]^{4.223} \quad (2.18.9)$$

溶接部に対しては：

$$f_s = \left[ \frac{100 \left\{ 1 - (UPKIC_{(A)} / UPKIC_{(U)})^2 \right\}}{100Cu + 14} \right]^{4.223} \quad (2.18.10)$$

ただし、上限値は以下の式で計算する。

$$f_s = \left[ \frac{100 \left\{ 1 - \left( \frac{UPKIC_{(A)}}{UPKIC_{(U)}} \right)^2 \right\}}{42.39} \right]^{6.658} \quad (2.18.11)$$

(4) 再脆化を考慮した上部棚靱性値の算出

上式から算出した  $f_s$  を用いて次式から再照射をうけた後の上部棚靱性値を評価する。

$$CvUSE = CvUSE_{(U)} \times \sqrt{1 - D/100} \quad (2.18.12)$$

ここで、

$CvUSE_{(U)}$  : 中性子照射を受ける前のシャルピー上部棚吸収エネルギー

$D = (100Cu + 9) \cdot (f + f_s)^{0.2368}$  : 母材に対する値

$D = (100Cu + 14) \cdot (f + f_s)^{0.2368}$  : 溶接部に対する値

$D = 42.39 \cdot (f + f_s)^{0.1502}$  : 上限値

$Cu$  : 銅の含有率 (wt%)

$f$  : 焼鈍後のフルエンス ( $\times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ )

である。

RG1.162 による焼鈍後の上部棚靱性値評価手法を模式的に図 A2.18.4 にまとめる。

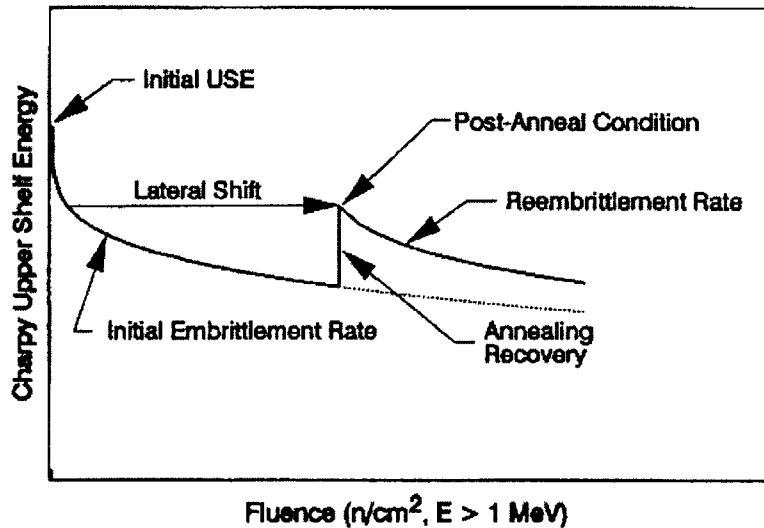


図 A2.18.4 RG1.162 を用いた焼鈍後の上部棚靱性値評価手法

## A2.19 自動調整階層別モンテカルロ法

PASCAL では、半楕円き裂に関する階層別モンテカルロ法による破損確率計算の効率を向上させるためには、各階層き裂採点及びき裂平面分割の最適化手法を整備した。

この最適化手法で破損確率解析を実施する場合は、まず最初にき裂平面分割に関する最適化を一度実施し、その後き裂採点数の最適化を必要な精度を達成するまで実施する。

### A2.19.1 き裂採点数の最適化

階層別モンテカルロ法では、各セルごとにき裂の採点数を設定することが可能である。しかし初期き裂平面の自動分割機能 (#CASPECT) では、採点数は全セル同一で取り扱われるため、各セルごとに採点数を変えることができない。採点数を変えるには初期き裂階層平面のユーザ定義 (#CASPCU) を用いる必要がある。

一般的に、解析結果に及ぼす影響の高いセルに関して採点数を増やし、影響の低いセルに関して採点数を減らせば良いのであるが、影響の大きさはフルエンスや解析条件によって異なるため、解析実施前に最適な採点数を決定することは困難である。

PASCAL に整備された最適化手法は解析を行っている最中に各セルの採点数を自動的に最適化する。最適化手法を以下に示す。

#### (1) テスト解析の実施

従来の解析では、各セルごとの採点数を多く (100~1000 点程度) とっていたが、自動調整を行う場合は、セルごとの採点数は少なく (10 点等) 設定する。全セルに対して、この少数点のき裂を採点して解析を行い、各セルごとの破壊確率を算出する。各セルごとの破壊確率は次式から算出される。

$$\begin{aligned} \text{各セルごとの破壊確率} = & (\text{対象セルのき裂破壊数}) / (\text{対象セルのき裂採点数}) \\ & \times (\text{対象セルの重み}) \end{aligned}$$

各セルごとの破壊確率を全て足し合わせれば、全体の破壊確率になる。

#### (2) 採点数の最適化

破壊確率が一度算出されれば、どのセルが解析結果に高い影響を及ぼすか判断することができる。き裂深さの小さなき裂は重みは大きいが破損割合が低いので破壊確率としては小さな値となる。また非常に深いき裂は破損割合は高いが重みが小さいため、これも破壊確率としては小さな値となる。

この破壊確率の結果を用いて、次式から各セルごとの採点数を算出する。

$$\text{各セルの採点数} = (\text{各セルの破壊確率}) / (\text{全体の破壊確率}) \times (\text{全採点数})$$

つまり、全採点数を破壊確率の割合に応じて再分配する。

しかし、テスト解析でのき裂採点数が少なければ、本来破壊が生じるようなセルであっても破壊が生じない場合もありうる。破壊確率にばらつきが生じているため、隣り合ったセル同士でも採点数が急激に変化し、解析上問題がある。

これに対して、PASCAL ではき裂採点の平準化を行うことによってこの問題点を解決している。平準化のルールは「対象セルの採点数を、対象セルの上下左右のセルの採点数と比較し、対象セルの採点数が上下左右のセルの採点数の最大値の 2/3 倍よりも小さい場合は、対象セルの採点数を上下左右のセルの採点数の 2/3 倍に変更する」である。平準化を実施することによって、破壊確率に対する影響の大きい部分は採点数が多く、影響の低い部分は採点数が小さくなり、採点数の不連続性もかなり解消されていることが確認できた。一方、単純な平準化の作業によって、全採点数はかなり増大してしまうため、PSACAL では、さらに全採点数を初期設定値になるように調整した。

### (3) 解析の繰り返し

新しく得られた採点数を用いて全セルの解析を行うと、新しい破壊確率が得られる。この値を用いて採点数の最適化に関する再評価を実施し、更に妥当な採点数を計算する。この過程を繰り返しながら解析を進め、破壊確率が設定された計算精度に収束するまで解析を実施する。

もともと、解析に時間を要するのはき裂が進展した場合である。特にき裂の進展判定手法にき裂の深さと長さの両方向を用いると、き裂は深さ方向・長さ方向どちらにも微小区間づつ進展していくため、非常に解析時間を要する。き裂が進展する可能性が高い領域は、初期き裂深さの深い領域であるが、自動調整層別モンテカルロ法では、この領域の重みが小さいため採点数が少ない。よって、同じ採点数であっても計算時間は従来の層別モンテカルロ法に比べ短縮されることになる。

また、従来の層別モンテカルロ法では、各セルごとに大量のき裂採点を行いながら解析を進めていたため、全体の破壊確率は解析が終了するまで把握することができなかった。しかし、自動調整階層別モンテカルロ法では、少ない採点数で全セルに対する計算を行い、これを何度も繰り返しながら採点数を増やしていくため、解析の途中でも全体の破壊確率を把握することができる。

得られた破壊確率を用いて、解析の収束判定を行う。以下の式を用いて収束判定値を算出する。

$$\varepsilon = \left| \frac{P_{f-now} - P_{f-pre}}{P_{f-now}} \right| \quad (2.19.1)$$

$\varepsilon$  : 収束判定値

$P_{f-now}$  : 現在の破壊確率

$P_{f-pre}$  : 前回のイタレーションで算出された破壊確率

### A2.19.2 き裂平面階層分割の最適化

初期き裂階層平面の自動分割機能 (#CASPECT) では、き裂平面は等間隔に分割する。しかし、き裂深さの深い階層は解析結果にほとんど影響を及ぼしておらず、この部分を細かく分割する意義は薄い。逆に破壊確率に及ぼす影響の高い箇所については、細かく階層分割し、より詳細な解析を実施するのは妥当である。

これに対して、PASCAL ではき裂平面の階層分割の最適化手法も整備しており、これを以下に示す。

#### (1) テスト解析の実施

テスト解析の実施については、採点数の最適化と同様である。採点数を少なくした状態で全セルに対する解析を行い、各セルごとの破壊確率および全体の破壊確率を得る。この段階では、き裂階層平面は等間隔に分割される。

#### (2) 最適化

各セルの破壊確率を、深さ ( $a/t$ ) 及びアスペクト比 ( $a/b$ ) が同一なセルごとに足し合わせる。深さに注目して足し合わせた結果の 1 例を図 A2.19.1 に示す。

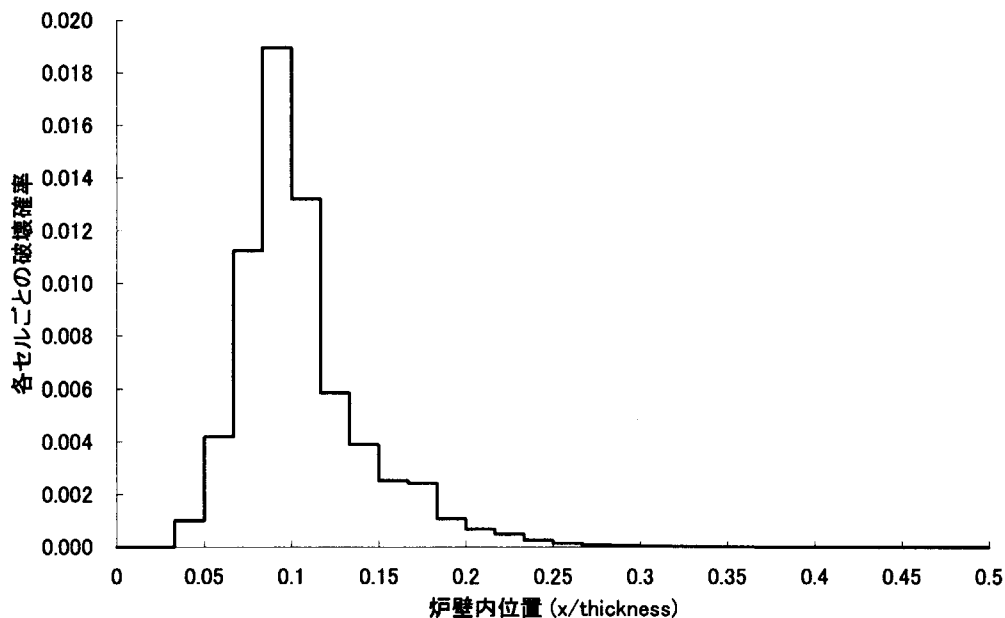


図 A2.19.1 各セルごとの破壊確率例 (深さ方向分割区間に対して)

図 A2.19.1 では、各セルの幅は同一であるが破壊確率が異なるため、各セルごとの影響度がそれぞれ異なる。そこで、図 A2.19.1 の結果に基づき各セルごとの影響度 (セル幅×破壊確率) が同一になるようにセル幅を変更し、さらにセル幅に関して左右のセル幅との比の許容値を用いてスムージング処理を施し平準化を図った。左右のセル幅との比の許容値を 1.1 とした場合の結果の 1 例を図 A2.19.2 に示す。セル幅がなめらかに変化していることが確認できる。

アスペクト比方向についても同様な処理を行った。処理後の結果の 1 例を図 A2.19.3 に示す。



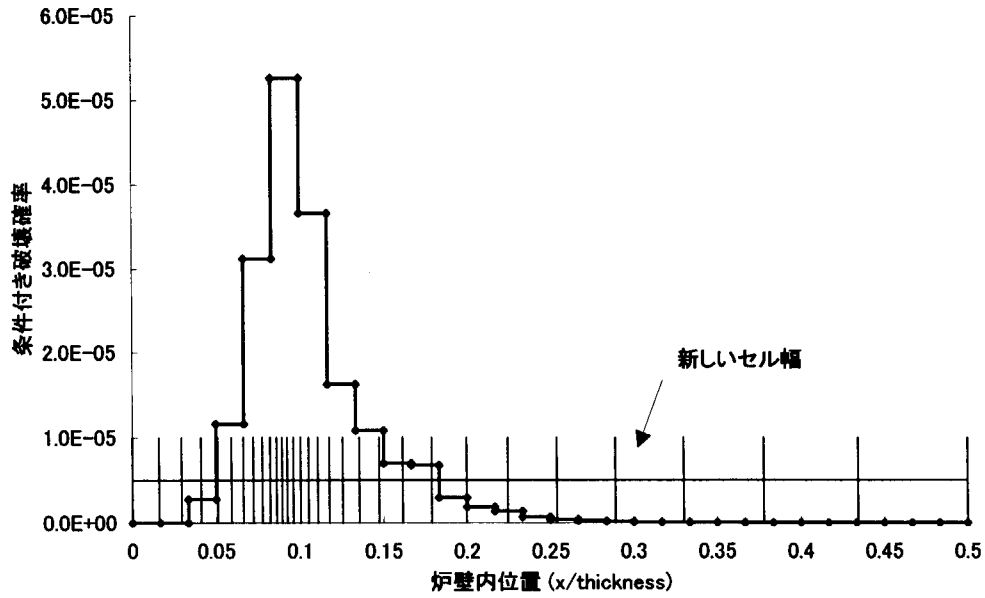


図 A2.19.2 セル幅の最適化 (深さ比方向、スムージング処理後)

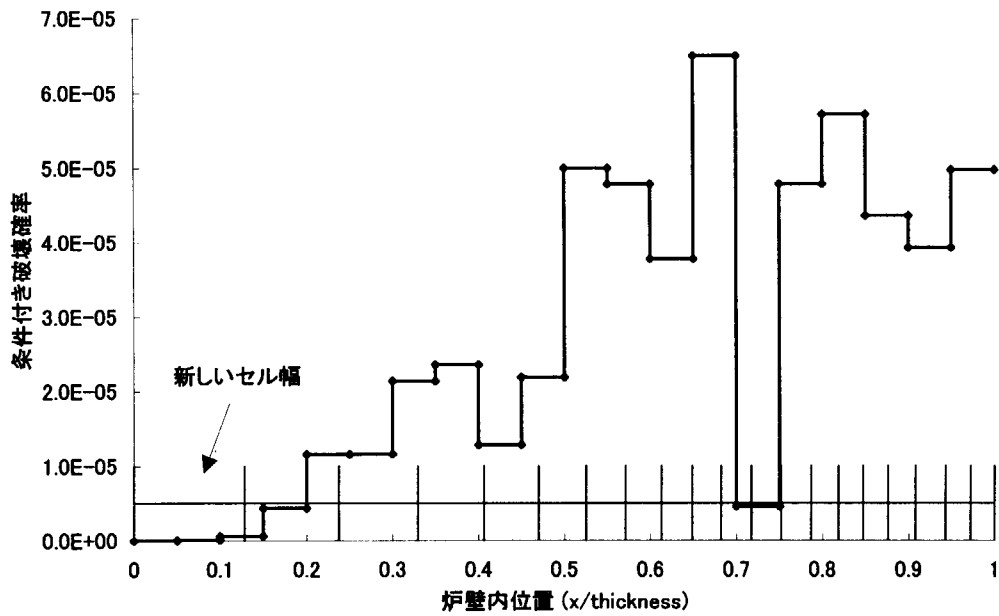


図 A2.19.3 セル幅の最適化 (アスペクト比方向、スムージング処理後)

(3) 重みの算出

最適化されたセル幅が得られたので、このセル幅に基づき、各セルの重みを算出する。

(4) テスト解析の結果のクリアー

き裂平面分割の最適化では、セルの大きさが変化しているため、テスト解析から得られた破

壊確率等を使用することができない。よって、テスト解析の結果を一度クリアする必要がある。

(5) 最適化されたき裂平面を用いた解析の実施

最適化されたき裂平面を用いて、再度解析を実施する。この際、き裂採点数の最適化処理を用いない場合は、解析は 1 イタレーションで終了する。き裂採点数の最適化処理も利用する場合は、再解析の 1 イタレーション目は各セルとも同一採点数で計算し、その結果得られた破壊確率分布を用いて、2 イタレーション目から採点数の最適化を行っていく。

階層分割の自動調整を行うと、少ない総階層数で高精度の解析結果が得られる。

き裂平面分割及び採点数の最適化を実施する場合と実施しない場合の破壊確率の収束する様子の 1 例を図 A2.19.4 に示す。最適化を実施した場合の解の収束は速くなったことが確認できる。

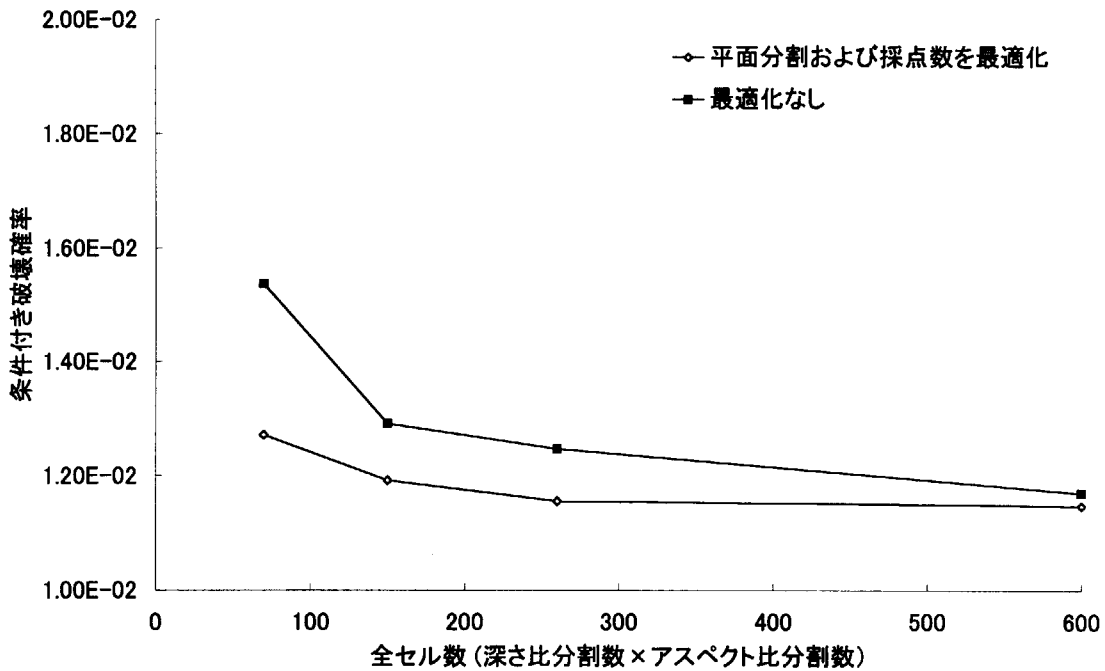


図 A2.19.4 き裂平面分割の最適化 (軸方向半楕円き裂)

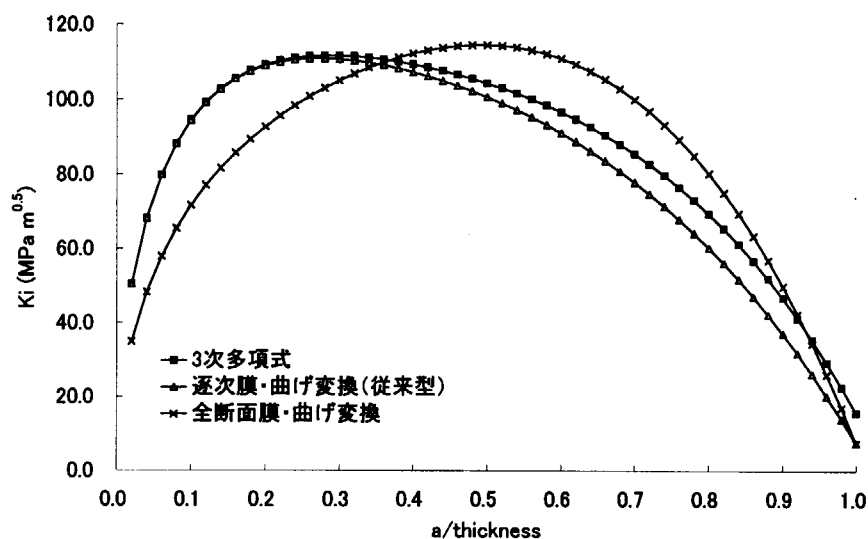
## A2.20 逐次膜・曲げ応力変換手法

加圧熱衝撃事象に伴う応力は通常容器壁の肉厚方向に高次（3次以上）多項式の形で分布している。これに対して、Newman-Rajuの解を含めた多くの応力拡大係数は膜・曲げ応力しか対応していない。この高次多項式の応力分布を単純に膜・曲げ応力に変換し、応力拡大係数を計算すれば、高次応力分布による応力拡大係数への寄与は無視されることになり、正確な値を求めるができない。PASCALで整備された逐次膜・曲げ応力変換手法は、入力された3次多項式の応力分布はに対して、き裂付近での応力に着目し、この応力を適切に膜・曲げ応力に変換することによって、膜・曲げ応力に対応した応力拡大係数を用いながら3次多項式分布に対する応力拡大係数値を精度良く算出することができる。

### A2.20.1 全断面逐次膜・曲げ応力変換手法

この手法では、容器内表面から外表面までを均等に100分割し、各位置（き裂深さ）において、入力された3次多項式による応力分布からき裂先端までの応力を抽出し、これを膜・曲げ応力に変換する。各き裂深さにおける応力拡大係数はこれらの位置で変換された膜・曲げ応力を用いて計算する。

半楕円き裂に対する白鳥の応力拡大係数の解に逐次膜・曲げ変換方式を適用した場合の数値結果の1例を図A2.10.1に示す。この事例では応力に関してNRC/EPRIの加圧熱衝撃ベンチマーク解析基本問題のトランジェント10分のものを使用し、アスペクト比 $a/b=0.4$ とした。



図A2.20.1 従来型逐次膜・曲げ変換手法による応力拡大係数

図A2.20.1から、逐次膜・曲げ変換手法による応力拡大係数は全断面の膜・曲げ応力による応力拡大係数に比べ、解析精度がかなり改善されていることが確認できる。しかし、大きなき裂深さに関しては依然と誤差が存在する。PASCALでは、さらに改良型逐次膜・曲げ変換手法を用いることにより、き裂が深い場合の解析精度を向上させた。

### 2.20.2 部分断面逐次膜・曲げ応力変換手法（改良手法）

全断面逐次膜・曲げ応力変換手法では、容器内表面からき裂先端までの応力を膜・曲げ応力に変換し、応力拡大係数の計算を実施した。これに対して、部分断面逐次膜・曲げ応力変換手法では、応力拡大係数を支配しているのはき裂先端付近の応力である前提から、容器内表面付近で一部分の応力を応力拡大係数の計算から除外し、き裂先端からき裂の中間部分までの応力を膜・曲げ応力に変換することによって、応力拡大係数の計算を実施した。除外量に関しては多項式応力の各次数についてケーススタディを行うことごとによって、最も妥当な値を決定した。

3次多項式の応力成分のうち、0次および1次項は直接的に膜・曲げ応力に変換できるので問題ない。除外量を決定する必要があるのは2次項および3次項である。

ケーススタディの結果から、求められた応力除外量を以下に示す。

#### (1) 応力2次項に関する応力除外量

応力2次項に関して求められた応力除外量を以下のように示す。

$0.0 \leq a/t \leq 0.7$  の場合：

$$A = A_{21} + \frac{A_{22} - A_{21}}{0.7} \frac{a}{t} \quad (2.20.2)$$

$0.7 < a/t < 1.0$  の場合：

$$A = A_{22} + \frac{A_{23} - A_{22}}{0.3} \left( \frac{a}{t} - 0.7 \right) \quad (2.20.3)$$

ここで、

$$A_{21} = -0.1056(a/b)^2 + 0.3348(a/b) - 0.0281$$

$$A_{22} = -0.6842(a/b)^3 + 1.8373(a/b)^2 - 1.6786(a/b) + 0.7255 \quad (2.20.4)$$

$$A_{23} = 0.12$$

である。また、 $A$  は応力除外量、 $a$  はき裂深さ、 $b$  はき裂長さの半長、 $t$  は容器肉厚である。

#### (2) 応力3次項に関する応力除外量

応力3次項に関する応力除外量を以下のように示す。

$0.0 \leq a/t \leq 0.7$  の場合：

$$A = A_{31} + \frac{A_{32} - A_{31}}{0.7} \frac{a}{t} \quad (2.20.5)$$

$0.7 < a/t < 1.0$  の場合：

$$A = A_{32} + \frac{A_{33} - A_{32}}{0.3} \left( \frac{a}{t} - 0.7 \right) \quad (2.20.6)$$

ここで、

$$A_{31} = -0.0277(a/b)^2 + 0.2288(a/b) - 0.0266$$

$$A_{32} = -0.8914(a/b)^3 + 2.1467(a/b)^2 - 1.7800(a/b) + 0.7548 \quad (2.20.7)$$

$$A_{33} = 0.16$$

である。

入力された 3 次多項式応力分布により応力拡大係数を計算する際は、まず上記式を用いて応力除外量を計算し、そして、応力除外量に従って容器内表面の応力を除外し、残りのき裂先端までの応力から膜・曲げ応力に変換することによって、応力拡大係数を計算すればよい。

改良型逐次膜・曲げ応力変換手法による応力拡大係数に関する計算結果の 1 例を図 A2.20.2 に示す。この事例の計算では、トランジェントに関して、NRC/EPRI ベンチマーク解析<sup>12)</sup>の条件を適用しており、10 分で応力を用いた。また、応力拡大係数に関しては白鳥式を用いた。

図 A2.20.2 から、改良型逐次膜・曲げ応力変換手法による応力拡大係数は直接に 3 次応力分布に対応した応力拡大係数の解から計算した値とほぼ同じであり、精度が高いことが確認できる。

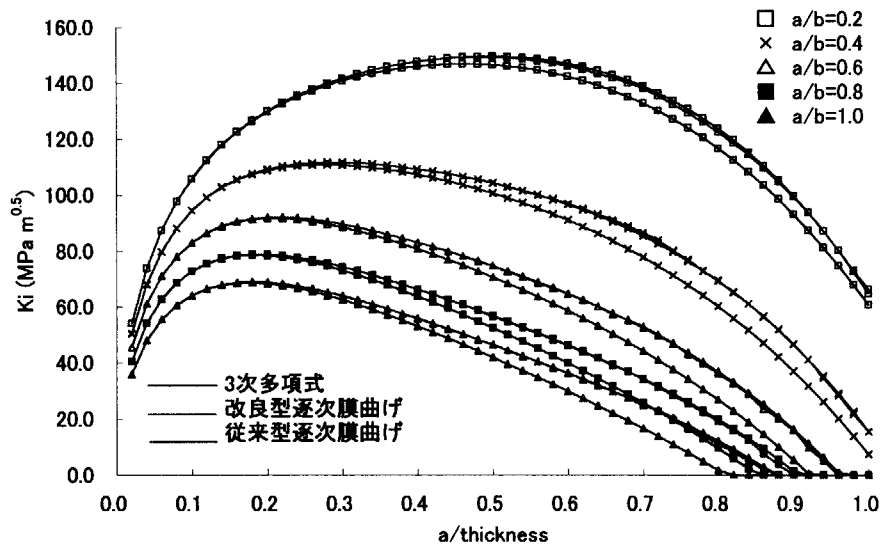


図 A2.20.2 改良型逐次膜・曲げ変換手法による応力拡大係数

## A2.20.3 応力拡大係数と適用可能な応力分布

PSCAL では複数の応力分布形式と複数の応力拡大係数を考慮することができる。主な応力拡大係数式と適用可能な応力分布の関係を表 A2.20.1 に示す。

(逐次)：無限長き裂に関しては逐次膜曲げ応力変換手法を用いれば適用でき、半楕円き裂に関しては逐次及び改良逐次膜曲げ応力変換手法を用いれば適用できる

また、平板中の無限長き裂に関する影響関数法 (Flag No.:51) はデータテーブルによる離散点の応力を入力する場合は適用できる。

表 A2.20.1 応力拡大係数式と適用可能な応力分布の関係

Flag No.	応力拡大係数式	膜・曲げ応力 (cladなし)	3次多項式 (cladなし)	膜・曲げ応力 (cladあり)	3次多項式 (cladあり)
無限長き裂に対して					
11	VISA-II式 (膜・曲げ応力、周方向)	○	○ (逐次)	—	—
12	Data Table (膜・曲げ応力、周方向)	○	○ (逐次)	—	—
13	VISA-II式 (3次多項式、周方向)	—	○	—	—
14	PASCAL式 (3次多項式、周方向)	—	○	—	—
21	VISA-II式 (膜・曲げ応力、軸方向)	○	○ (逐次)	—	—
22	Data Table (膜・曲げ応力、軸方向)	○	○ (逐次)	—	—
23	VISA-II式 (3次多項式、軸方向)	× <sup>D)</sup>	○	—	—
24	PASCAL式 (3次多項式、軸方向)	× <sup>D)</sup>	○	—	—
31	簡略法 (膜・曲げ応力、周方向)	—	—	○	○ (逐次)
33	簡略法 (3次多項式、周方向)	—	—	× <sup>D)</sup>	○
41	簡略法 (膜・曲げ応力、軸方向)	—	—	○	○ (逐次)
43	簡略法 (3次多項式、軸方向)	—	—	× <sup>D)</sup>	○
半楕円き裂に対して					
11	Newman-Raju式 (周方向)	○	○ (逐次)	—	—
12	白鳥式 (周方向)	○	○	—	—
13	VISA-II式 (周方向)	○	○	—	—
14	関東式 (周方向)	○	○ (逐次)	—	—
21	Newman-Raju式 (軸方向)	○	○ (逐次)	—	—
22	白鳥式 (軸方向)	○	○	—	—
23	VISA-II式 (軸方向)	○	○	—	—
24	関東式 (軸方向)	○	○ (逐次)	—	—
31	簡略法 (Newman-Raju式、周方向)	—	—	○	○ (逐次)
41	簡略法 (Newman-Raju式、軸方向)	—	—	○	○ (逐次)

### A2.21 残留応力の考慮

本解析コードは残留応力を取り扱うことができる。応力分布を 3 次多項式で入力される。全応力成分はこの 3 次多項式応力とトランジェントによる応力と加算して得られる。R6 による評価を行う場合は、この残留応力を 2 次応力として取り扱う。

### A2.22 高温予荷重効果

PASCAL では、現在の時間ステップでの応力拡大係数と、1 つ前の時間ステップでの応力拡大係数を比較し、応力拡大係数が減少する場合はき裂の進展が発生しないものとみなして、高温予荷重の効果を表現する

### A2.23 主な確率変数

本解析コードで取り扱っている主な確率変数は以下の項目である。

- ① Cu, Ni, Si, P などの化学成分含有率
- ② フルエンス、 $\Delta RT_{NDT}$ 、破壊靱性値
- ③ 初期き裂分布
- ④ き裂非検出確率

本解析コードでは、③と④に関しては様々な評価式で考慮しており、詳細に関しては関連する節を参照して頂きたい。①と②の確率変数の確率分布に関しては全て正規分布として、平均値と標準偏差を入力することによって、変数の値を決定している。

参考のため、NRC/EPRI のベンチマーク解析<sup>12)</sup>での主な確率変数の確率もモデルを表 A2.23.1 に示す。

表 A2.23.1 NRC/EPRI のベンチマーク解析で用いる主な確率変数モデル

項 目	値
$RT_{NDT0}$ の標準偏差	9.444°C
$\Delta RT_{NDT}$ の標準偏差	0.0
$\Delta RT_{NDT}$ 標準偏差の打切割合	標準偏差の 5 倍
中性子照射量の標準偏差	平均値の 30%
Cu の含有率の平均値	0.3wt%
Cu の含有率の標準偏差	0.025wt%
Ni の含有率の平均値	0.75wt%
Ni の含有率の標準偏差	0.00wt%
$K_{Ic}$ の標準偏差	平均値の 10%
$K_{Ic}$ の標準偏差の打切割合	標準偏差の 5 倍
$K_{Ia}$ の標準偏差	平均値の 10%
$K_{Ia}$ の標準偏差の打切割合	標準偏差の 5 倍

**A2.24  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  の相関の考慮**

PASCAL では以下のように  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  の相関関係を考慮する。

$$K_{Ia} = \sigma_{KIA} \left( C_{KIC} + Z \sqrt{1 - \rho^2} \right) + K_{Ia}^{mean} \tag{2.24.1}$$

ただし、

$$C_{KIC} = \frac{\rho(K_{Ic} - K_{Ic}^{mean})}{\sigma_{KIC}}$$

$\sigma_{KIA}$  :  $K_{Ia}$  の標準偏差

$\sigma_{KIC}$  :  $K_{Ic}$  の標準偏差

$Z$  : 正規分布を持つ乱数

$\rho$  :  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  の偏差の相関係数

$K_{Ia}^{mean}$  :  $K_{Ia}$  の平均値

$K_{Ic}^{mean}$  :  $K_{Ic}$  の平均値

である。

相関係数  $\rho$  を 1.0 とした場合に算出された  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  の偏差を図 A2.24.1 に示す。横軸は  $K_{Ic}$  の偏差、縦軸は  $K_{Ia}$  の偏差である。  $\rho=1.0$  の場合は両者は完全に一致するため、グラフは斜め  $45^\circ$  の直線になる。同様に  $\rho$  を 0.75 とした場合の  $K_{Ic}$  と  $K_{Ia}$  の関係を図 A2.24.2 に示す。

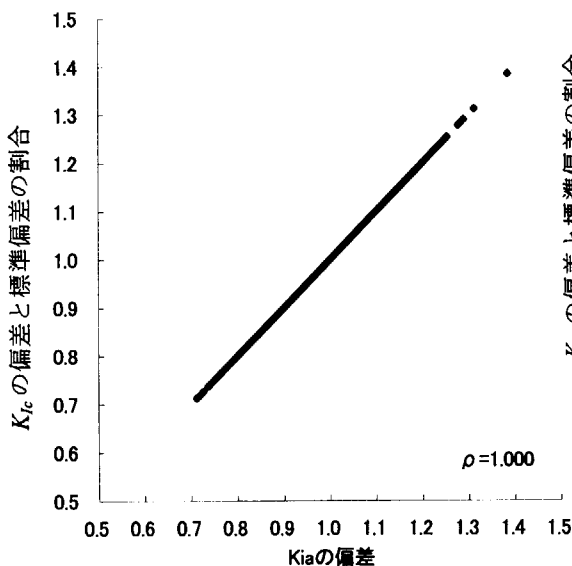


図 A2.24.1 相関係数  $\rho=1.0$  とした場合の  $K_{Ic}$  の偏差と  $K_{Ia}$  の偏差の関係

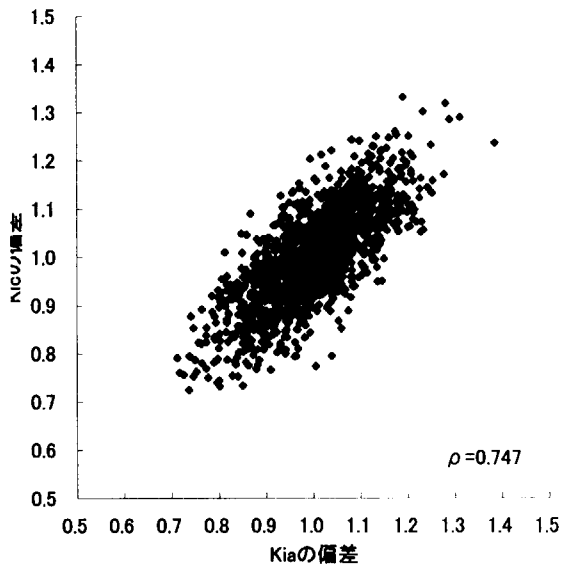


図 A2.24.2 相関係数  $\rho=0.75$  とした場合の  $K_{Ic}$  の偏差と  $K_{Ia}$  の偏差の関係



### A2.25 感度解析用連続計算機能

PASCAL では感度解析用連続計算機能を整備している。この機能では、入力された解析条件の一部を変更しながら、連続解析を実施することができる。感度解析用連続計算機能の入力カード「#CONT」の例を図 A2.25.1 に示す。

```
#CONT
$SETSTART A5-STR3D-2.0
  1 1
Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=2.0
  3 3
  2.0
$SETEND
$SETSTART A5-STR3D-1.0
  1 1
Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=1.0
  3 3
  1.0
  4 7
  6
  10.0 20.0 30.0 50.0 75.0
  100.0
$SETEND
C---+---10---+---20---+---30---+---40---+---50---+---60
#END
C---+---10---+---20---+---30---+---40---+---50---+---60
```

図 A2.25.1 感度解析用連続計算機能によるデータカード 1 例

まず、#CONT は入力カードの最後、「#END」の直前に記述する必要がある。

#CONT は「\$SETSTART」と「\$SETEND」ではさまれる複数の区間によって構成される。この「\$SETSTART」と「\$SETEND」の入力条件が 1 つのセットとして取り扱われ、感度解析パラメータが変更される。図 A2.25.1 の場合は、2 つの入力セットが存在している。

\$SETSTART の後ろには、一文字スペースをはさみ、そのセットの解析結果を出力するファイル名を入力する。

\$SETSTART 以下の行では、まずカードセット No.とデータ No.を入力する。この番号はプログラム使用マニュアルに記述されている。例えば、解析タイトルを修正するときは、カードセット No.=1 (#TITLE)、データ No.=1 (ANAME) であり、フルエンスを修正するときは、カードセット No.=3 (#VESSEL)、データ No.=3 (FLUEC) となる。

その次の行に、修正したいデータを入力する。これは、各データごとに入力フォーマットが異なるので、注意が必要である。

また、時刻歴の温度分布を修正するような場合は、温度分布の全てを再入力する必要がある。

## A2.26 決定論的解析機能

### (1)機能概要

PASCAL は、P F M解析で得られる破損確率について、決定論的な評価との比較を行うため、初期亀裂の平均値、破壊靱性値の平均値及び上下限值 ( $\pm \alpha \sigma$ ) を入力できる決定論的解析機能を有している。解析手順は下記の通りである。

- ・すべての確率変数は一定値（標準偏差ゼロ）で与える。
- ・亀裂寸法は、分布で与えられる場合は、平均値等の代表値を入力する。
- ・解析結果は決定論的解析用出力ファイル（ファイル No.37）に出力する。
- ・破壊基準として、 $K_{Ic}/K_{Ia}$  基準及び R6 法基準が選択できる。

破壊基準が  $K_{Ic}/K_{Ia}$  基準の場合について出力項目を以下に示す。このうち、過渡事象時刻以外の項目はき裂最深部の先端及び（半楕円き裂の）長さ方向の先端の値を出力する。

- ・過渡事象時刻
- ・き裂寸法
- ・き裂先端温度
- ・き裂がない圧力容器のき裂先端位置における応力値
- ・き裂先端照射量
- ・き裂先端  $RT_{NDT}$
- ・き裂先端応力拡大係数
- ・き裂先端  $K_{Ic}$ 、 $K_{Ia}$

また、破壊基準が R6 法である場合の出力項目を以下に示す。

- ・過渡事象時刻
- ・き裂寸法
- ・き裂先端温度
- ・き裂先端位置における全応力、1 次応力、2 次応力値
- ・き裂先端照射量
- ・き裂先端  $RT_{NDT}$
- ・き裂先端の全応力、1 次応力、2 次応力による応力拡大係数
- ・き裂先端の  $K_{mat}$  値
- ・き裂先端の  $K_r$  値
- ・き裂先端の  $L_r$  値
- ・き裂先端の破壊評価曲線の  $K_r$  値

### (2)JEAC4206 に関する検証解析例

#### ・解析条件

JEAC4206 に関する決定論解析では、容器形状・寸法・物性及び過渡事象については NRC/EPRI ベンチマーク解析の解析条件を用いている。初期き裂分布についてはマーシャル分布、脆化予測式及び破壊靱性予測式については JEAC の評価式 (A3.2.1 及び A2.10.4) を用いている。決定論解析で用いる化学成分などの主な確率変数の評価モデル及びその値を表 A20.26.1 に示す。

表 A2.26.1 決定論解析(JEAC4206)で用いる主な確率変数の値

項 目	本解析で用いる値
$T_{0J\_0}$ の平均値	-8.925°C
$T_{0J\_0}$ の標準偏差	0.0
$\Delta RT_{NDT}$ の標準偏差	0.0
中性子照射量の標準偏差	0.0
上部靱性値	219.8 MPa $\sqrt{m}$
流動応力	551.6 MPa
Cu の含有率の平均値	0.2wt%
Cu の含有率の標準偏差	0.0
Ni の含有率の平均値	1.0wt%
Ni の含有率の標準偏差	0.0
Si の含有率の平均値	0.2wt%
Si の含有率の標準偏差	0.0
$K_{Ic}$ の標準偏差	0.0
$K_{Ia}$ の標準偏差	0.0

## (3) NRC/EPRI ベンチマーク A5 問題の決定論解析

## ・解析条件

NRC/EPRI ベンチマーク問題では、クラッドを考慮せず、物性値の温度依存性もない。主な解析条件を表 3.2.2 に示す。また、A5 問題では軸方向の無限長き裂を評価対象としており、き裂の深さ分布モデルをマーシャル分布としている。

## ・解析結果

温度分布及び応力分布の時刻歴については PASCAL の入力データ生成ツールを用いて得られた結果を適用している。以下に決定論的解析結果を示す。○が決定論的解析機能により求めた値であり、実線は別途解析した結果であり両者は良く一致し決定論的解析機能の有効性が確認できる。

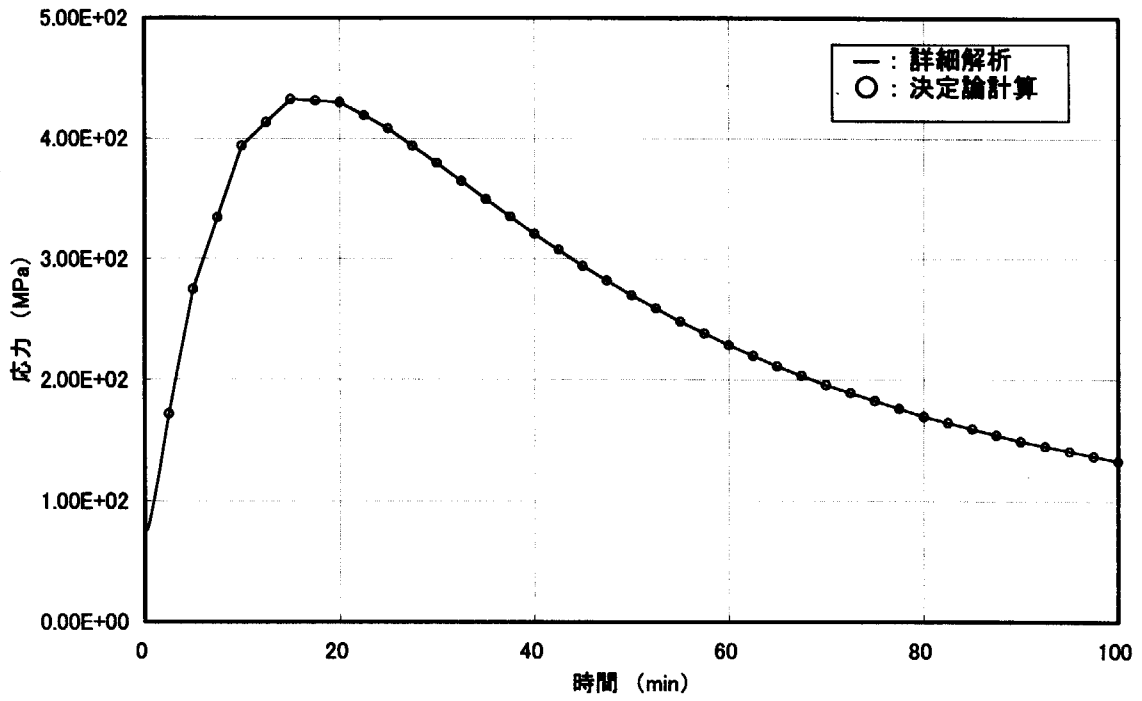


図 A2.26.1 き裂ない容器におけるき裂先端の応力に関する解析結果

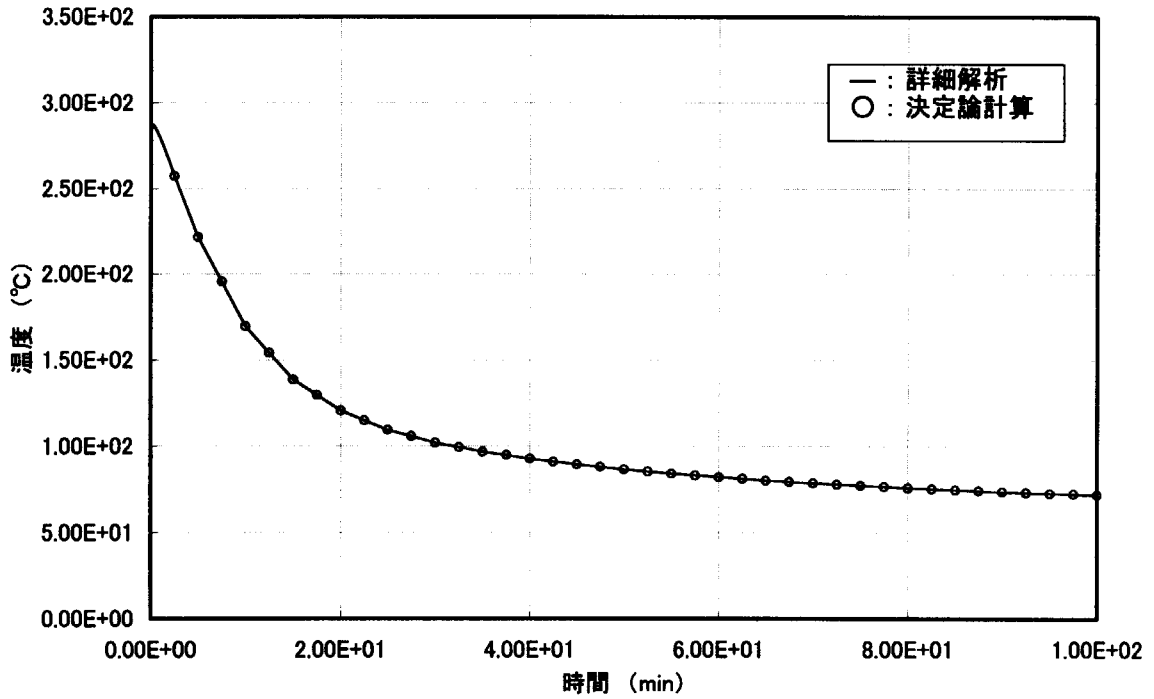


図 A2.26.2 き裂先端温度に関する解析結果

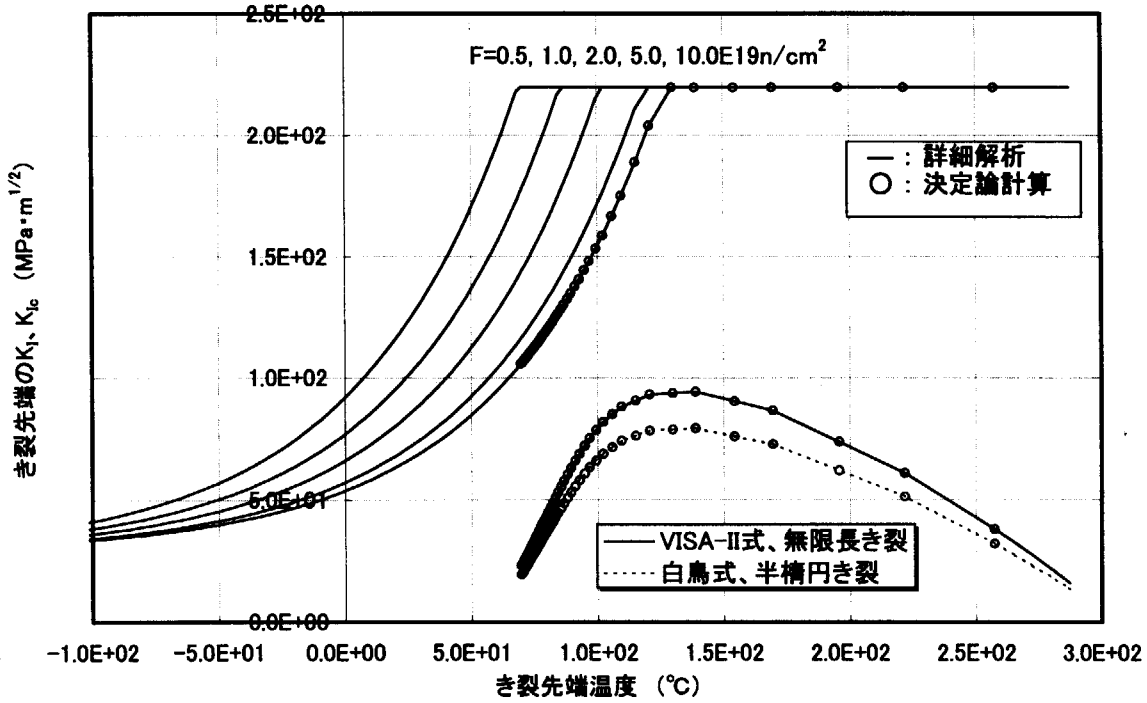


図 A2.26.3 き裂先端破壊靱性、応力拡大係数 vs き裂先端温度

表 A2.26.2 NRC/EPRI ベンチマーク基本問題の主な解析条件

容器寸法	
容器内半径 (m)	2.2860
容器内厚 (m)	0.2286
クラッド	なし
水温・内圧履歴	
初期水温 (°C)	288.0
最終水温 (°C)	65.6
冷却速度 (sec <sup>-1</sup> )	0.0025
内圧 (MPa)	6.895 (一定)
熱伝導解析物性値	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7833
比熱 (J/kg·K)	502.4
熱伝導率 (W/m·K)	41.54
熱伝達係数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	1817.0
熱応力解析物性値	
ヤング率 (MPa)	$1.9306 \times 10^5$
ポアソン比	0.3
熱膨張係数 (K <sup>-1</sup> )	$1.446 \times 10^{-5}$

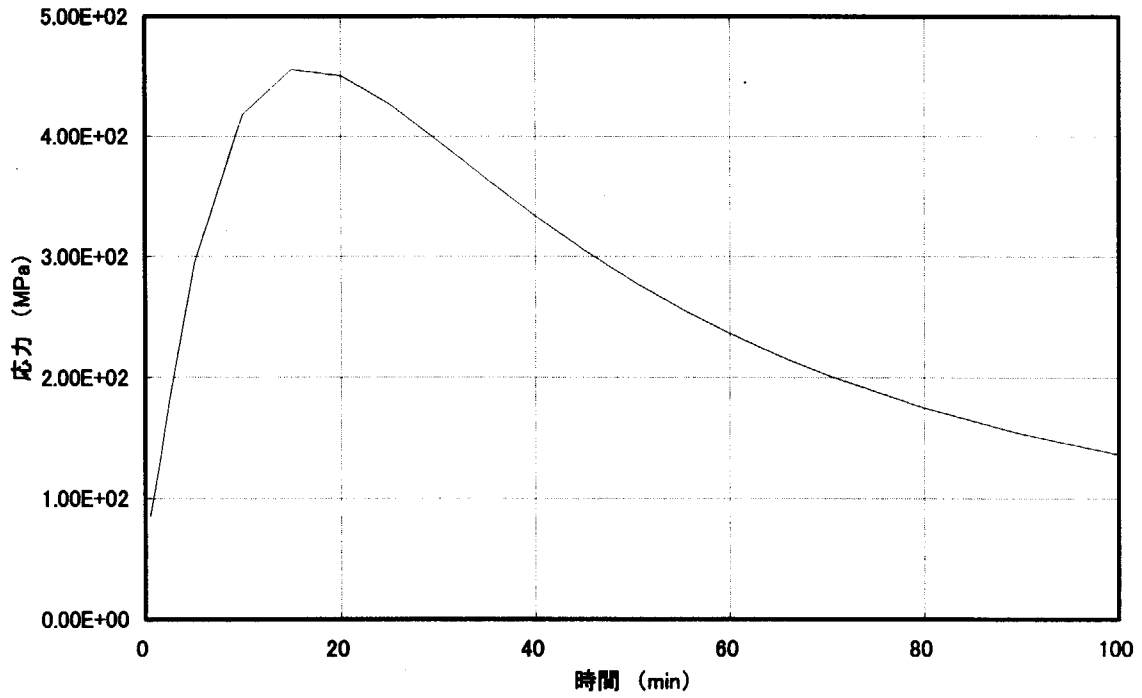


図 A2.26.4 き裂ない容器におけるき裂先端の応力に関する解析結果

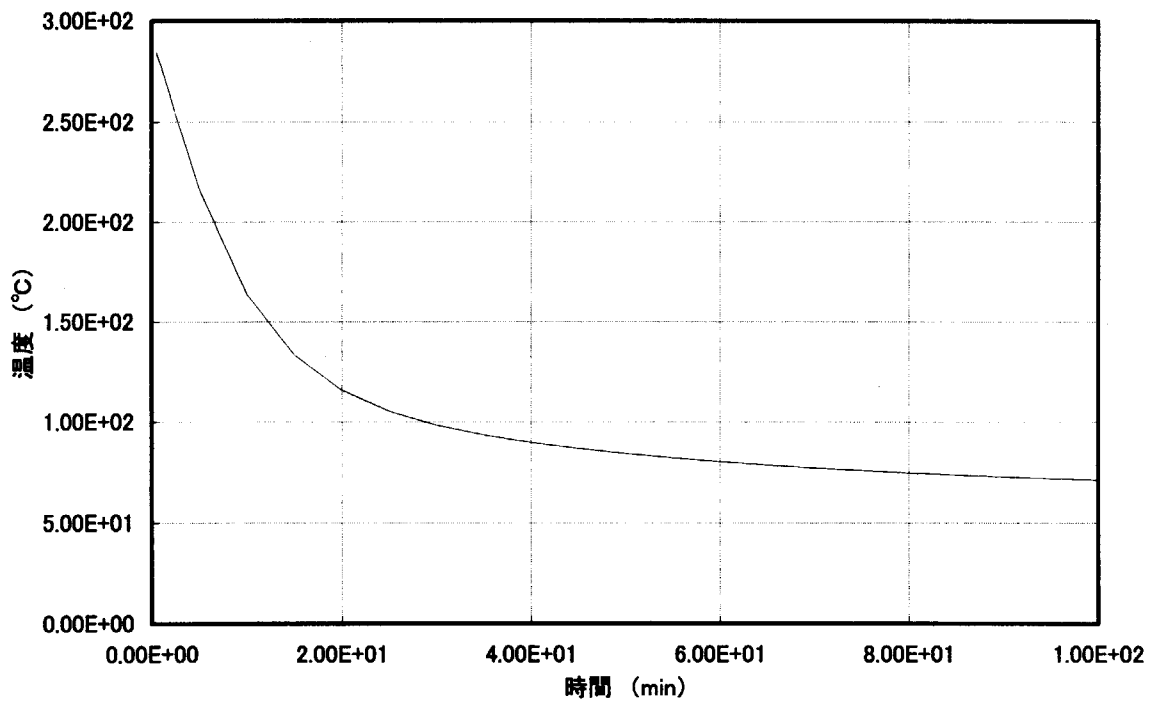


図 A2.26.5 き裂先端温度に関する解析結果

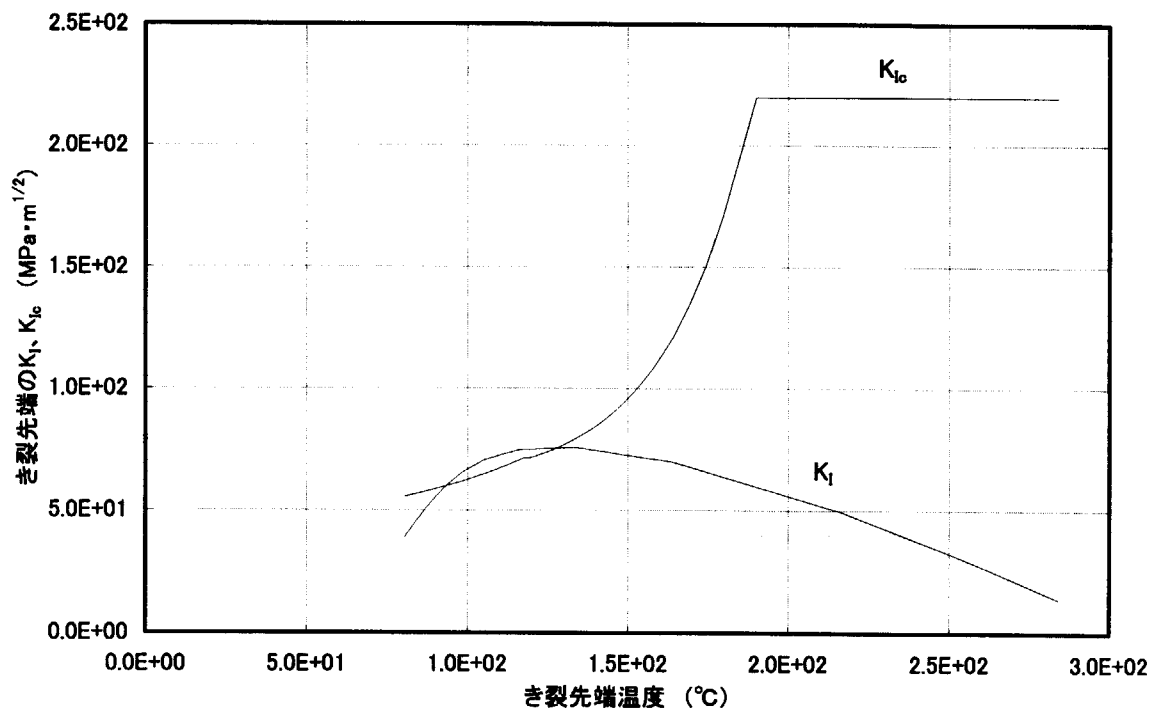


図 A2.26.6 き裂先端破壊靱性、応力拡大係数とき裂先端温度の関係

### (3) R6 法に関する決定論解析

#### ・解析条件

解析条件は上記の NRC/EPRI ベンチマーク A5 問題の解析条件を用いた。

R6 法のカテゴリ 1 とオプション 1 を用いて解析する場合は、 $K_{mat}$  に関しては  $K_{Ic}$ 、 $K_{Ia}$  を適用することができる。本解析では、これを NRC の平均曲線とした。

#### ・解析結果

決定論的解析結果を以下に示す。比較するために、 $K_{Ic}/K_{Ia}$  基準の場合の決定論的解析結果も併せて表示している。

各解析結果から、比較できる項目に関しては、 $K_{Ic}/K_{Ia}$  基準を用いた場合の計算値は R6 基準を用いた場合の計算値と良く一致しており、決定論解析機能は 6 法に関しても良好であることが分かる。

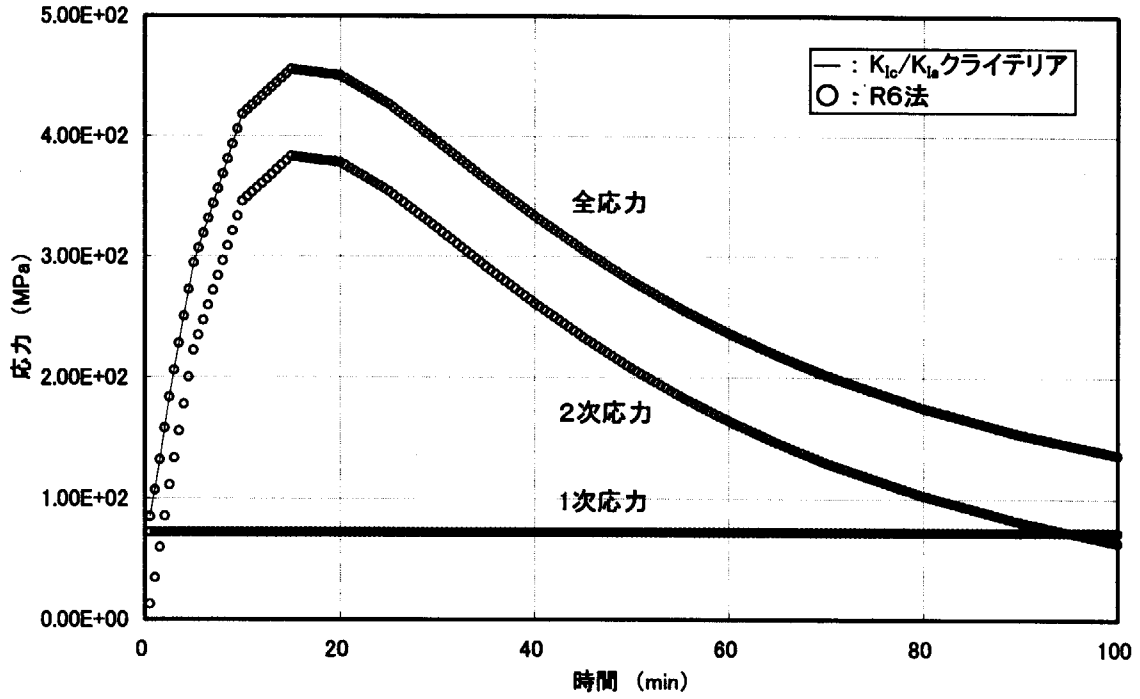


図 A2.26.7 き裂ない容器におけるき裂先端の応力に関する解析結果

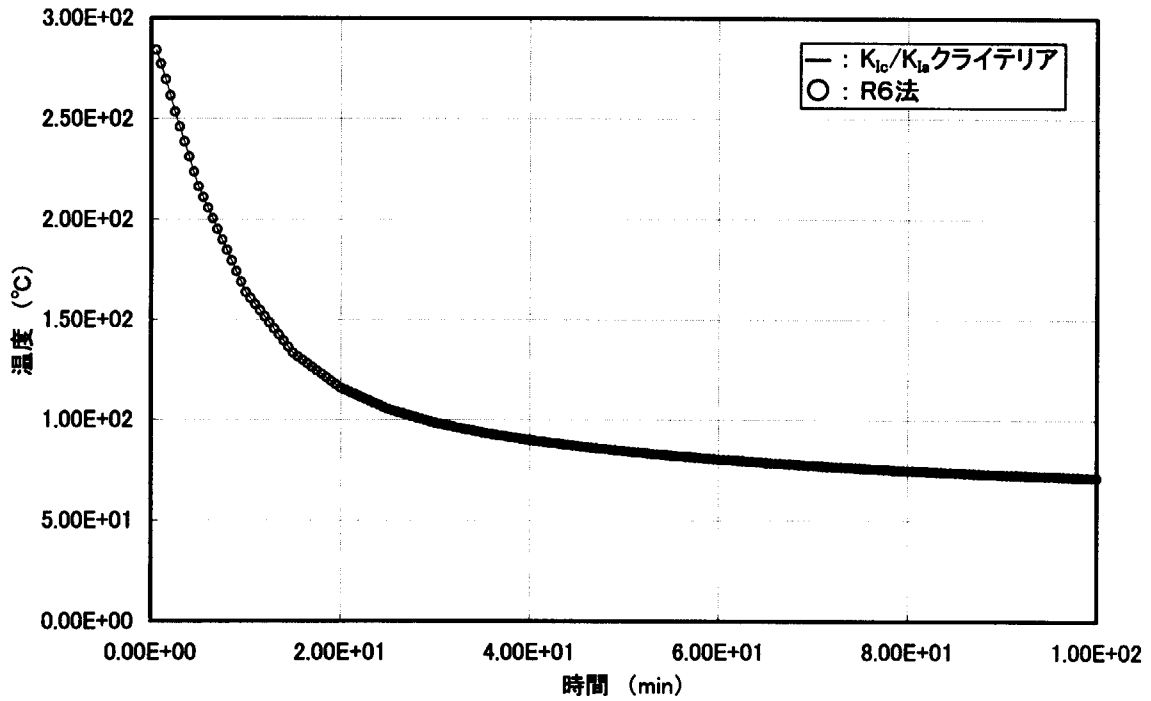


図 A2.26.8 き裂先端の温度に関する解析結果



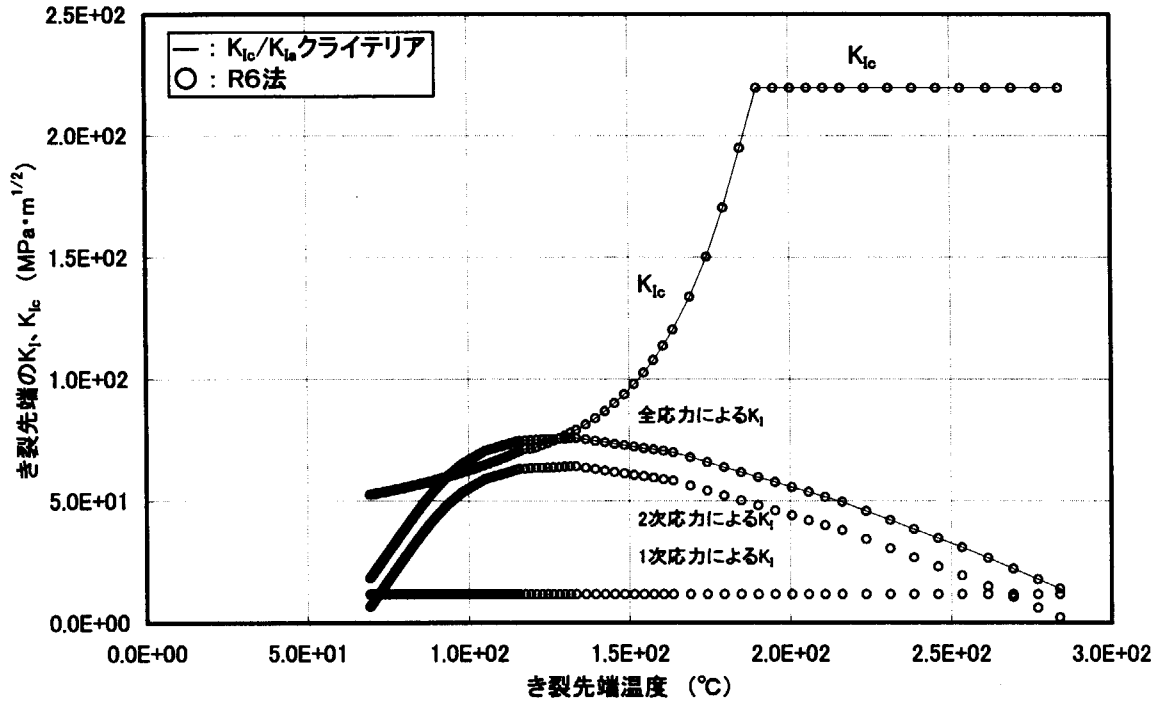


図 A2.26.9 き裂先端の破壊靱性に関する解析結果

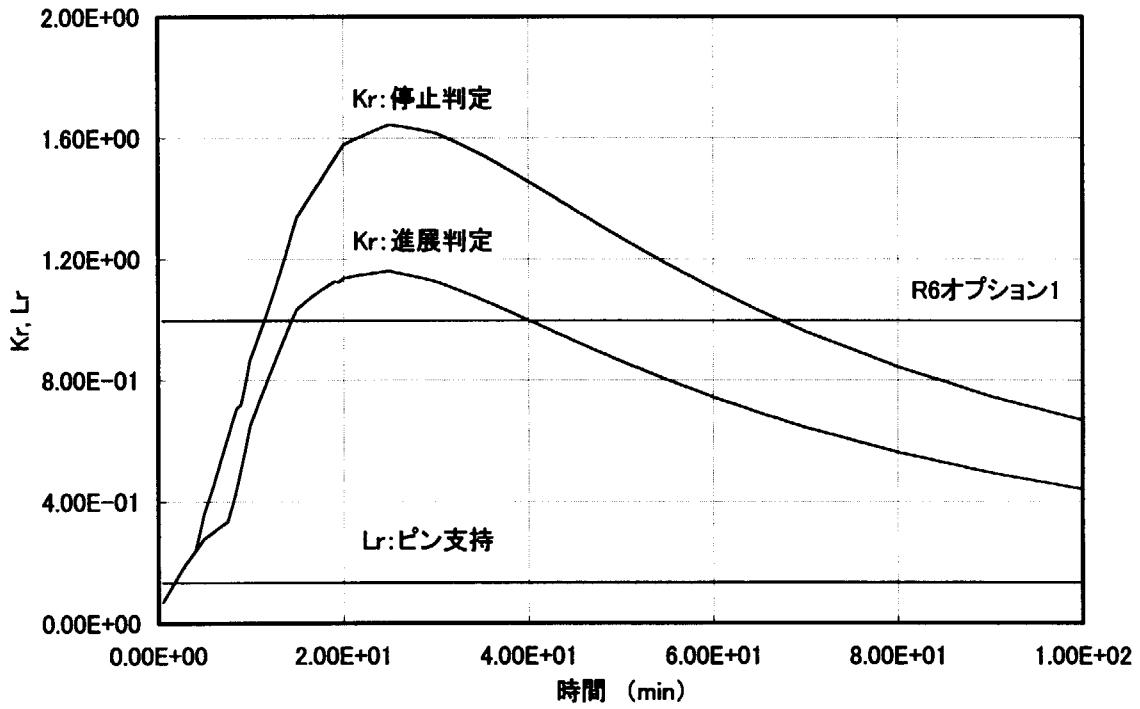


図 A2.26.10 き裂先端の  $K_r, L_r$  に関する解析結果

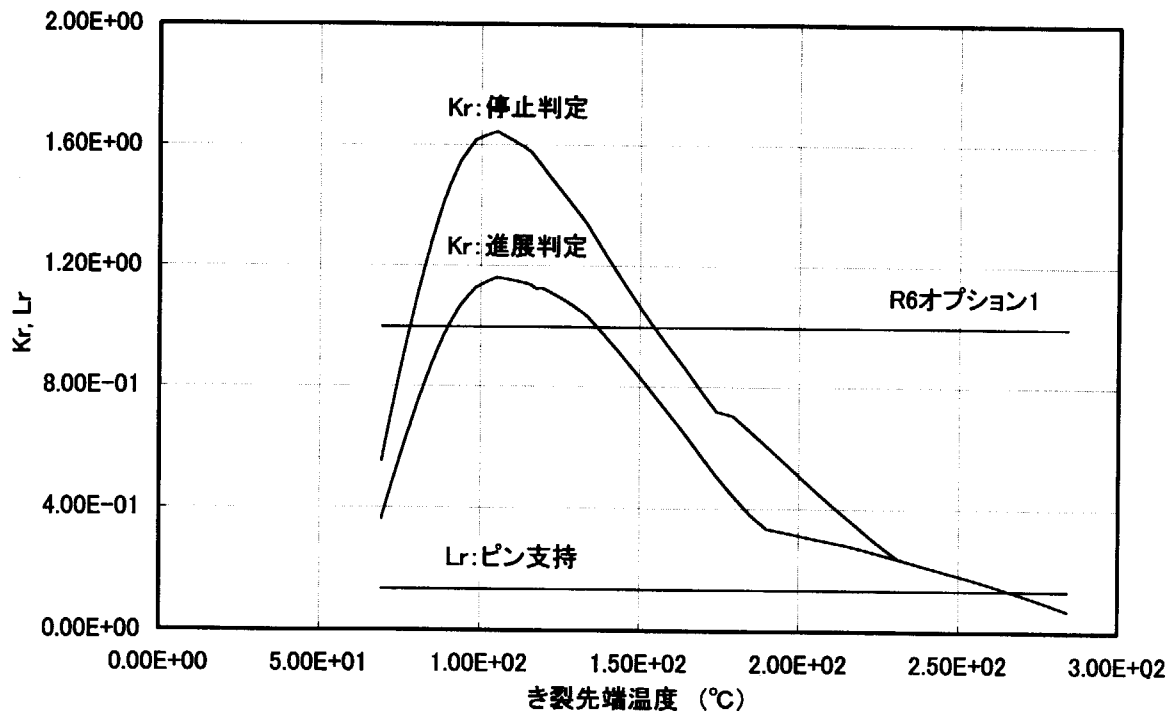


図 A2.26.11 き裂先端の Kr、Lr vs き裂先端の温度

## 付録2 参考文献

- 1) 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション、培風館、昭和49年。
- 2) 矢川元基：確率論的破壊力学による原子力施設の健全性評価、原子力工業、Vol.34, No.4, p19,(1988).
- 3) D. O. Harris, E. Y. Lim, et al: Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant, NUREG/CR-2189, (1981).
- 4) F. A. Simonen, K. I. Johnson, et al: A Computer Code for Predicting the Probability of Reactor Pressure Vessel Failure, NUREG/CR-4486.
- 5) C. B. Buchalet, and W. H. Bamford: Stress Intensity Factor Solutions for Continuous Surface Flaws in Reactor Pressure Vessels, Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, pp385-402, (1976).
- 6) G. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin: The Stress Analysis of Cracks Handbook. Del Research Corporation, Hellertown, Pennsylvania, 1983.
- 7) J. C. Jr. Newman and I. S. Raju: Stress-intensity Factor Equations for Cracks in Three-dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads, NASA Technical Memorandum 85793, NASA, (1984).
- 8) M. Shiratori: Analysis of Stress Intensity Factors for Surface Cracks Subjected to Arbitrarily Distributed Stress, Bulletin of Faculty of Engineering, Yokohama National Univ. Vol.35, p1, (1986).
- 9) 日本溶接協会 PFM 小委員会：原子力構造機器信頼性評価への確率論的破壊力学の適用法に関する調査研究 (II) 平成9年度報告書、JWES-AE-9804、平成10年。
- 10) 三好、石井、吉田：3次元表面き裂の貫通前・貫通後における応力拡大係数のデータベース、機論A、Vo.56, No.527, pp1563-1569, (1990).
- 11) C. B. Buchalet and W. H. Bamford: Method for Fracture Mechanics Analysis of Nuclear Reactor Vessels Under Severe Thermal Transients, ASME paper 75-WA/PVP-3, p2-12, 1975.
- 12) K. Balky, et al: Documentation of Probabilistic Fracture Mechanics Code Used for Reactor Pressure Vessels Subjected to Pressurized Thermal Shock Loading", EPRI TR-105001.
- 13) K. Shibata, D. Kato, Y. S. Li: Development of PFM Code for Evaluating Reliability of Pressure Components Under Transient Loading, 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), SMiRT-Paper No.:M1-A2- JP, August 15-20, Seoul, Korea, (1999).
- 14) Y. S. Li, D. Kato, K. Shibata: Sensitivity Analysis of Failure Probability on PTS Benchmark Problems of Pressure Vessel Using a Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code, Proc. 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7), April 19-23, Tokyo, JAPAN, ICONE-7266, (1999).
- 15) 柴田勝之・加藤大輔・李銀生：Development of a PV Reliability Analysis Code Based on Probabilistic Fracture Mechanics Methodology (1): Outline of the Code, Proc. of 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan II, p519(1998).
- 16) 加藤大輔・柴田勝之・李銀生：Development of a PV Reliability Analysis Code Based on Probabilistic Fracture Mechanics Methodology (2): Analysis Methodology, Verification and Sensitivity Analysis, Proc. of 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan II, p520(1998).

- 17) R. D. Cheverton and D. G. Ball: A Deterministic and Probabilistic Fracture-Mechanics Code Application to Pressure Vessels, NUREG/3618, (1984).
- 18) 電気技術規定、原子力編、原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法、JEAC4206、(1991)。
- 19) US NRC, Regulatory Guide 1.99 (Task ME 305-4): Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, Revision 2, 1988.
- 20) R. A. Anisworth, A. R. Dowling et al: Revision 3 of R6, Its Background and Validity, ECF6.
- 21) A. A. Willoughby, T. G. Davey: Plastic Collapse in Part-Wall Flaws in Plates, ASTM ST01020, pp.390-409, (1989).
- 22) 柴田、磯崎、山崎：非線形破壊力学簡易解析手法に基づく压力容器健全性解析プログラムの開発と例題解析、JEARI-Data/Code 95-015, (1995).
- 23) M. Tomimatsu, S. Asada and H. Namatame: Evaluation of RPV Steel Surveillance Program in Japanese PWR: Radiation Embrittlement, Prediction, Proceedings of the 9th International Symposium on Reactor Dosimetry, Prague, 1996, Sep., p1-8, (1996).
- 24) D. O. Harris, D. D. Dedhia et al: Theoretical and User's Manual for pc-PRAISE, NUREG/CR-5864, (1992).
- 25) T. Arakawa: Japanese Evaluation of the Japanese Results, Ultrasonic Inspection of Heavy Section Steel Components, The PISC II Final Report Part-II, p409-427, (1988).
- 26) US NRC, Regulatory Guide 1.162: Format and Content of Report for Thermal Annealing of Reactor Pressure Vessels, 1996.
- 27) 曾根田：PTS ベンチマーク解析による確率論的破壊力学解析コードの評価、電中研研究報告、T93053, (1993).
- 28) E.D.Eason, et al: Multivariable Modeling of Pressure Vessel and Piping J-R Data, NUREG/CR-5729, 1991.

## A2.11 脆化予測式

PASCAL では、脆化予測式に関しては以下の3つのモデルを考慮することができる。

- ・ JEAC4206 の国内予測式
- ・ 米国 RG1.99 Rev.2 式
- ・ ユーザ入力式

### A2.11.1 JEAC206 の国内脆化予測式

JEAC206 の国内脆化予測式<sup>18)</sup>は次式に示す。

$$\Delta RT_{NDT} = FF \cdot CF + \text{margin} \quad , \quad ^\circ C \quad (2.11.1)$$

ただし、 $FF$  は中性子照射ファクター (Fluence Factor) で、 $CF$  は化学成分ファクター (Chemistry Factor) である。

母材に対しては、

$$\begin{aligned} CF &= -16.0 + 1210.0 \cdot P + 215.0 \cdot Cu + 77.0 \sqrt{Cu \cdot Ni} \\ FF &= \left( F / 10^{19} \right)^{(0.29 - 0.04 \cdot \log_{10}(F / 10^{19}))} \\ \sigma &= 12.0, ^\circ C \end{aligned} \quad (2.11.2)$$

溶接材に対しては、

$$\begin{aligned} CF &= 26.0 - 24.0 Si - 61.0 \cdot Ni + 301.0 \sqrt{Cu \cdot Ni} \\ FF &= \left( F / 10^{19} \right)^{(0.25 - 0.10 \cdot \log_{10}(F / 10^{19}))} \\ \sigma &= 15.0, ^\circ C \end{aligned} \quad (2.11.3)$$

である。

### A2.11.2 米国 Regulatory Guide 1.99 (Rev.2)式

米国 Regulatory Guide 1.99 (Rev.2)式<sup>19)</sup>は次のように示す。

$$\Delta RT_{NDT} = FF \cdot CF \quad , \quad ^\circ F \quad (2.11.4)$$

ただし、 $FF$  について次式で評価する。

$$FF = \left( F / 10^{19} \right)^{(0.28 - 0.10 \cdot \log_{10}(F / 10^{19}))} \quad (2.11.5)$$

また、 $CF$  について、溶接材の場合は次式で評価する。

$$CF_{weld} = 360 \cdot Cu \{ 1 + 1.38 [ \text{erf}((0.3 \cdot Ni - Cu) / Cu) + 1 ] \}, ^\circ F \quad (2.11.6)$$

母材の場合は以下の式の大きいほうで評価する。

$$CF_{Gathrie} = -38.2 + 574.6 \cdot Cu + 526.46 \cdot Cu \cdot \tanh(0.304 \cdot Ni / Cu), ^\circ F \quad (2.11.7)$$

$$CF_{0dette} = 388.8 \cdot Cu \{ 1 + 0.33 [ \text{erf}((0.77 \cdot Ni - Cu) / Cu) + 1 ] \}, ^\circ F \quad (2.11.8)$$

以上の式において、 $\text{erf}$  は誤差関数である。

1例として、 $cu=0.3\text{wt}\%$ ,  $Ni=0.75\text{wt}\%$ 、溶接部の脆化予測式の比較を図 A2.11.1 に示す。

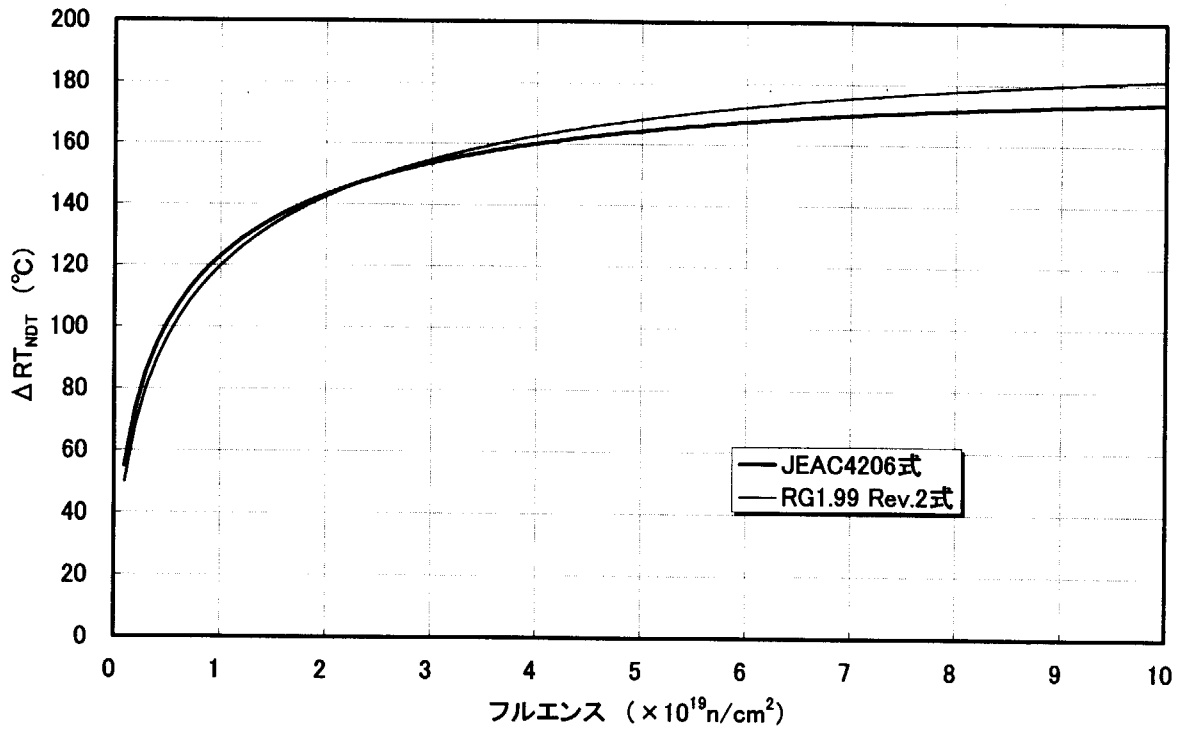


図 A2.11.1 JEAC4206 式と RG1.99 Rev.2 式の比較事例

**A2.12 偏差再計算手法**

き裂進展に伴う  $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$ 、と  $RT_{NDT}$  の評価については、その評価方式はき裂進展確率に殆ど影響しないが、破壊確率に大きな影響を与える。PASCAL では、以下の3つの評価方式を考慮している。

**(1) VISA-II 方式**

この評価方式ではき裂が進展するごとに、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$ 、と  $RT_{NDT}$  の平均値と標準偏差の再計算を行う。

**(2) OCA-P 方式**

き裂が進展するごとに、標準偏差の再計算は  $RT_{NDT}$  について行わず、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  だけについて行う。

**(3) FAVOR 方式**

き裂が進展するごとに、 $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$ 、と  $RT_{NDT}$  の平均値の再計算を行うが、標準偏差を最初に評価するときの値を用いる。

これまでの感度解析<sup>15)~16)</sup>から、FAVOR の評価方式は最も高い破損確率をあたえることが分かる。また、VISA-II 方式及び FAVOR 方式はき裂進展刻みの大きさなどパラメータの変更に影響を受けやすい。

**A2.13 破壊クライテリア**

PASCAL では、以下の破壊クライテリアを考慮することができる。

- ・  $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  基準及び塑性崩壊基準
- ・ R6 法

**A2.13.1  $K_{IC}$ 、 $K_{Ia}$  の基準**

き裂の進展が開始するときの判定基準<sup>4)</sup>は

$$K_I > K_{IC} \quad (2.13.1)$$

であり、き裂進展が停止するときの判定基準は

$$K_I \leq K_{Ia} \quad (2.13.2)$$

である。

また、以下の条件を満たすと破壊とみなす。

$$a = r \cdot t \quad (2.13.3)$$

ただし、 $a$  はき裂の深さ、 $t$  は容器壁の肉厚、 $r$  は破壊とみなす容器壁肉厚の割合である。PASCAL では、 $r$  をユーザによって設定することができる。

**A2.13.2 塑性崩壊基準**

塑性崩壊基準<sup>4)</sup>を以下に示す

$$\bar{\sigma}_p \geq \sigma_f \quad (2.13.4)$$

ここで、 $\sigma_f$  は流動応力、 $\bar{\sigma}_p$  は圧力による応力の平均値であり、軸方向き裂に対して、

$$\bar{\sigma}_p = \frac{P \cdot R}{(t-a)} \quad (2.13.5)$$

周方向き裂に対して、

$$\bar{\sigma}_p = \frac{P \cdot R}{2(t-a)} \quad (2.13.6)$$

である。この中で、 $P$  は内圧、 $a$  はき裂深さ、 $R$  は圧力容器内半径、 $t$  は容器の肉厚である。

**A2.13.3 R6 法(Rev.3)**

R6 法<sup>20)</sup>は英国中央電力庁 CEGB によって整備されたもので、線形弾性条件による破壊から塑性崩壊条件による破壊に至るまでの広範囲な破壊現象を統一的に取り扱う破壊基準で、“2クライテリア法”とも呼ばれる。この手法は3つの破損評価曲線と3つの材料カテゴリを用いて破損の判定を行う。

R6 法の詳細を次の節を参考して頂きたい。



### A2.14 R6法の解析手順

R6法では以下の2つのパラメータによって破壊の限界を表現する。

- ・線形破壊の尺度を表すパラメータ： $K_r$

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{mat}} + \left\{ \frac{K_I^S}{K_{mat}} + \rho \right\} \quad (2.14.1)$$

この中で、 $K_I^P$ と $K_I^S$ はそれぞれ一次応力、二次応力による応力拡大係数、 $K_{mat}$ は破壊靱性値である。また、 $\rho$ は二次応力に対する補正係数、以下のように求められる。

$$\rho = \begin{cases} \rho_1 & L_r \leq 0.8 \\ 4\rho_1(1.05 - L_r) & 0.8 < L_r \leq 1.05 \\ 0 & 1.05 < L_r \end{cases} \quad (2.14.2)$$

$$\rho_1 = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.1x^{0.714} - 0.007x^2 + 0.0003x^5 & 0 < x \leq 5.2 \\ 0.25 & x > 5.2 \end{cases} \quad (2.14.3)$$

$$x = \frac{K_I^S}{K_I^P} L_r \quad (2.14.4)$$

- ・塑性崩壊の尺度を表すパラメータ： $L_r$

$L_r$ は1次応力のみによって影響されるもので、次のように求められる。

$$L_r = L_r^P = \frac{P}{P_Y} \quad (2.14.5)$$

ただし、 $P$ は作用荷重、 $P_Y$ は降伏限界荷重である。

#### A2.15.1 R6法のオプションと解析カテゴリー

R6法は上記 $K_r$ と $L_r$ の2つのパラメータに基づいて、3つの破損評価曲線と3つの材料カテゴリーを利用して線形破壊から塑性崩壊までの広範囲な破壊判定を行う。

PASCALではR6法のオプション1とオプション2を考慮することができる。これらのオプションを以下に示す。

- ・オプション1の破壊評価曲線：

$$K_r = \begin{cases} \left\{ (1 - 0.14L_r^2) \left( 0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6) \right) \right\} & L_r \leq L_r^{\max} \\ 0 & L_r > L_r^{\max} \end{cases} \quad (2.14.5)$$

このオプションの1例を図A2.14.1に示す。

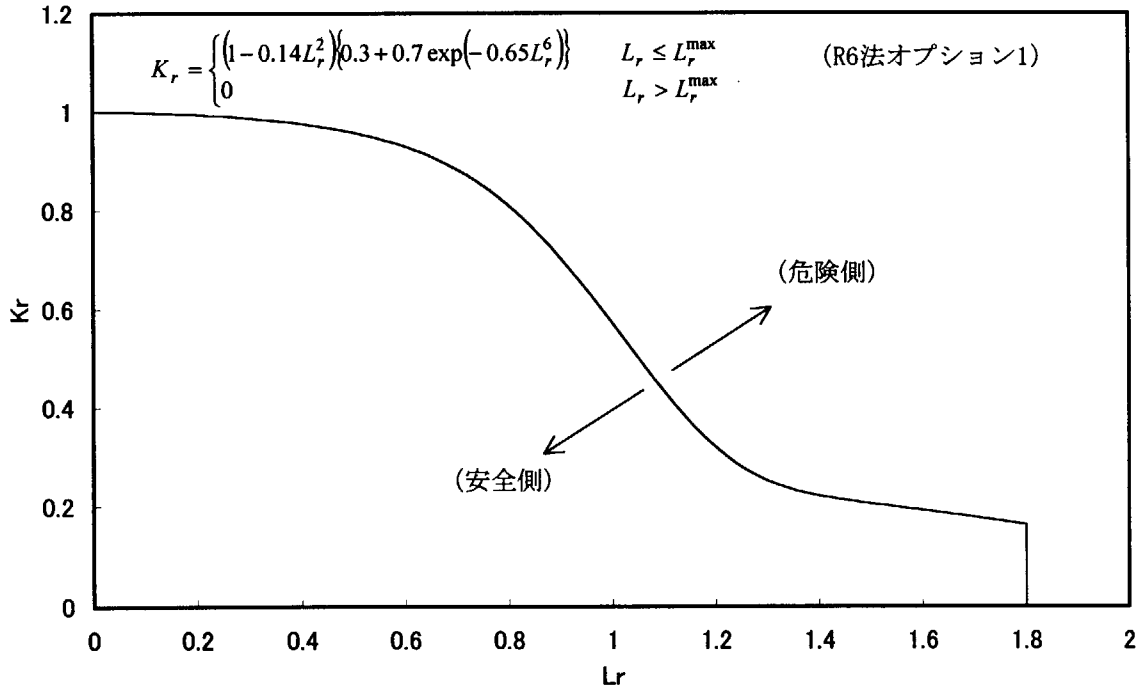


図 A2.14.1 破壊評価曲線オプション1の1例

・オプション2の破壊評価曲線：

$$K_r = \begin{cases} \left( \frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{L_r^3\sigma_y}{2E\varepsilon_{ref}} \right)^{\frac{1}{2}} & L_r \leq L_r^{\max} \\ 0 & L_r > L_r^{\max} \end{cases} \quad (2.14.6)$$

ただし、

$\varepsilon_{ref}$  : 真応力  $L_r\sigma_y$  に対応した対数ひずみ (=  $\ln(1+\varepsilon)$ )

$\sigma_y$  : 降伏応力

$E$  : ヤング率

である。この曲線は材料の真応力-対数ひずみ曲線があれば、決定することができる。

$K_{mat}$  は、R6法の材料カテゴリーごとに、表 A2.14.1 に示すように取り扱う。

表 A2.14.1 各カテゴリーごとの  $K_{mat}$

カテゴリー	$K_{mat}$
1	$K_{lc}$ 、 $K_c$ 、 $K_{0.2}$
2	$K_{\Omega}(\Delta a_j)$ (最大値は $K_g$ )
3	$K_{\Omega}(\Delta a_j)$

ここで、 $K_{Jc}$ 、 $K_c$ は線形弾性条件における破壊靱性値であり、 $K_{0.2}$ 、 $K_g$ 、 $K_{\Omega}(\Delta a_j)$ は $J$ 積分の値を用いて算出することができるパラメータである。

#### A2.14.2 $L_r$ の評価手法

$L_r$ の算出には、端部ピン支持と端部固定支持の2つの仮定に基づいた評価式を用いることができる。Willoughby<sup>21)</sup>らは実験データとの比較から、端部ピン支持は過大の安全側の評価となり、端部固定支持はより合理的な評価を与えることができるとしている。

##### (1) 両端ピン支持で拘束した場合

両端ピン支持で拘束した場合は、柴田ら<sup>22)</sup>の評価式を使用する。

$$L_r = 2 \left( \frac{\sigma_m^2}{\sigma_y} \right) / \left[ -A + \left\{ A^2 + 4 \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^2 \sigma_m^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.14.7)$$

ただし、

$$A = (2\sigma_b/3) + (2a\sigma_m/W) \quad (2.14.8)$$

$\sigma_m$ : 膜応力

$\sigma_b$ : 曲げ応力

$W$ : 肉厚

である。また、半楕円き裂を対象とする場合は、き裂の深さを以下の等価深さ $a_{eff}$ に置き換える。

$$a_{eff} = \frac{\pi ab}{4b + 2W} \quad (2.14.9)$$

ただし、 $b$ はき裂半長である。

##### (2) 両端固定支持で拘束した場合

両端固定支持で拘束した場合は Willoughby ら<sup>21)</sup>の評価式を用いる。

$$L_r = 2 \left( \frac{\sigma_m^2}{\sigma_y} \right) / \left[ -A + \left\{ A^2 + 4 \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^2 \sigma_m^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.14.10)$$

ただし、

$$A = 2\sigma_b/3 \quad (2.14.11)$$

である。

すなわち、拘束条件の違いは主にパラメータ $A$ に現れている。

### A2.14.3 Kr の評価方式

R6 法におけるパラメータ  $K_r$  は、1 次応力を用いて得られるパラメータ  $K_r^P$  および 2 次応力を用いて得られるパラメータ  $K_r^S$  を用いて、次式より算出される。

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{mat}} + \left\{ \frac{K_I^S}{K_{mat}} + \rho \right\} = K_r^P + K_r^S \quad (2.14.12)$$

ここで、1 次応力とは内圧によって発生する応力であり、PASCAL では入力された各時刻における内圧のデータから理論式を用いて算出する。また、2 次応力とは熱によって発生する応力であり、PASCAL では入力された各時刻の応力成分（全応力）から内圧によって発生する応力成分(1 次応力)を引いて算出する。

一方、R6 法を適用する場合は、本コードが取り扱える応力分布時刻歴の形式として、膜・曲げ形式と 3 次多項式形式の 2 つである。従って、内圧から計算された応力に対して、入力データの形式に従って、膜・曲げ形式か 3 次多項式形式かに変換する必要がある。

内圧によって発生する応力の算出式を以下に示す。

軸方向き裂の場合：

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \frac{P}{r^2} + \frac{a^2}{b^2 - a^2} P \quad (2.14.13)$$

周方向き裂の場合：

$$\sigma_z = \frac{a}{2(b-a)} P \quad (2.14.14)$$

ただし、

- $a$  : 容器内半径
- $b$  : 容器外半径
- $P$  : 内圧
- $r$  : 容器の中心からの距離

である。

軸方向応力は位置の関数ではないため、膜・曲げ形式か 3 次多項式形式かに変換するのは、周方向応力だけである。変換手法は最小 2 乗法を用いている。

### A2.14.4 R6 法カテゴリ 3 解析に対する標準 J-R 曲線の設定と解析標準化

R6 法カテゴリ 3 基準による解析を行う場合、亀裂先端の照射量と温度に対応する J-R 曲線が必用である。この J-R 曲線は、データテーブルにより与えることができるが、この入力データの作成は極めて困難である。そのため、既存の公表された照射材の破壊靱性データを利用し、照射材の J- $\Delta a$  曲線の平均値、標準偏差、カテゴリ一切替え温度等について下記の 2 種類の標準曲線を設定している。

#### (1) 国内データに基づく標準 J- $\Delta a$ 曲線の設定

ここで、J-R 曲線を上部靱性値の低下から評価する富松の手法<sup>23)</sup>について説明する。この手法では、上部靱性値の低下を次式により評価する。

母材の場合：

$$\Delta USE = \frac{UUS}{100} (2.40 + 102.6 \cdot Cu) \cdot f^{0.297 - 0.145 \log f} \quad (2.14.15)$$

溶接部の場合：

$$\Delta USE = \frac{UUS}{100} (7.20 + 97.0 \cdot Cu) \cdot f^{0.140} \quad (2.14.16)$$

ただし、

- $\Delta USE$  : 上部棚エネルギーの低下量 (J)
- $UUS$  : 初期上部棚エネルギー (J)
- $Cu$  : 銅の含有率 (wt%)
- $f$  : フルエンス ( $\times 10^{19} \text{ n/cm}^2 \text{ E} > 1 \text{ MeV}$ )

である。

母材について、上部棚靱性値の低下の 1 例を図 A2.14.2 に示す。ただし、初期上部棚エネルギーを 191 (J)、Cu 含有率を 0.09 %としている。

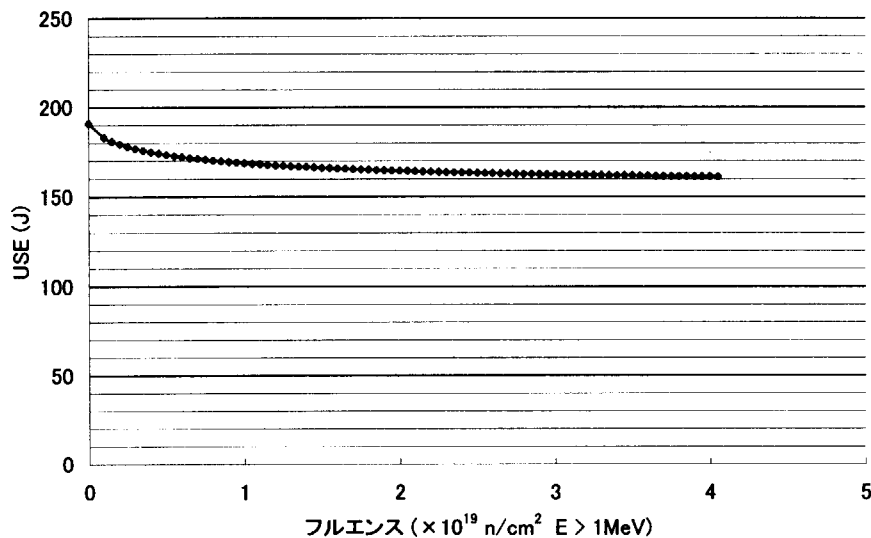


図 A2.14.2 上部棚エネルギーの低下予測量

上部棚靱性値の低下量から次式を用いて J-R 曲線を評価する。

$$J = C(\Delta a)^m \quad (2.14.17)$$

このなかで、

- 母材の場合 :  $C = -4.94 \times 10^{-4} \cdot USE \cdot T - 0.375 \cdot T + 2.624 \cdot USE + 53.0$
- :  $m = -1.59 \times 10^{-6} \cdot USE \cdot T - 9.96 \times 10^{-5} \cdot T + 1.83 \times 10^{-3} \cdot USE + 0.273$
- 溶接部の場合 :  $C = -8.74 \times 10^{-4} \cdot USE \cdot T - 0.372 \cdot T + 2.210 \cdot USE + 73.5$
- :  $m = -1.46 \times 10^{-6} \cdot USE \cdot T + 1.04 \times 10^{-4} \cdot T + 1.36 \times 10^{-3} \cdot USE + 0.315$

また、 $J$  は J 積分値 ( $\text{KJ/m}^2$ )、 $\Delta a$  はき裂進展量 (mm) である。

破壊靱性値は以下の関係式から算出できる。

$$K_{Ic} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} J(\Delta a) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.14.18)$$

以上の計算式を用いた破壊靱性と  $\Delta a$  の関係の 1 例を図 A2.14.3 に示す。図中では、初期上部棚エネルギーを 191(J)、Cu 含有率を 0.09 %、ヤング率を  $2.0 \times 10^5$  MPa、ポアソン比を 0.3 としている。

図 A2.14.3 から、初期の段階では  $\Delta a$  の増加に伴って破壊靱性値は急速に増加するが、 $\Delta a$  がある程度大きくなるとその増加傾向は徐々にゆるやかになることが分かる。そのため、PASCAL ではの  $\Delta a$  の限界値をユーザによって入力し、この限界値を超えた破壊靱性値を一定値としている。

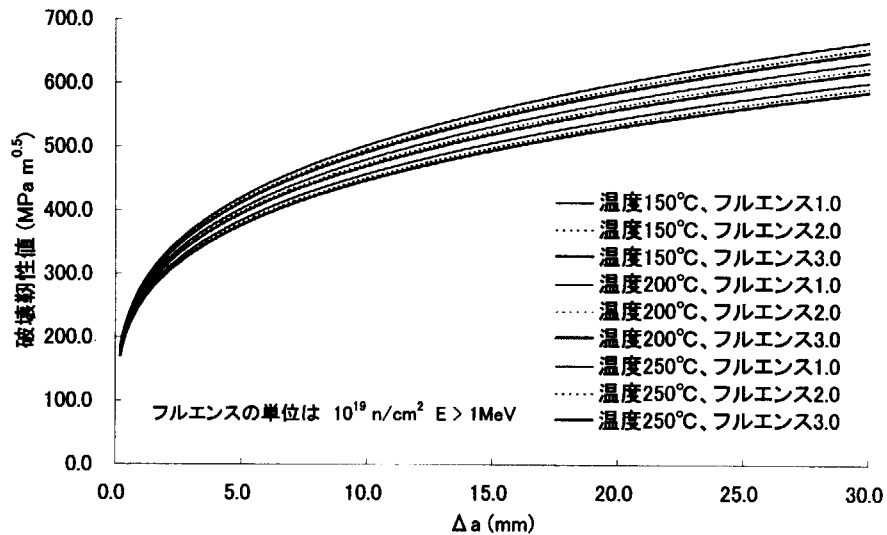


図 A2.14.3 破壊靱性値と  $\Delta a$  の関係

(2) 米国データに基づく標準 J- $\Delta a$  曲線

E.D.Eason ら<sup>28)</sup>は表 A2.14.1 に示す大量の試験片について実験データを分析し、非線形統計処理により RPV 溶接部、RPV 母材、配管溶接部及び配管母材の J- $\Delta a$  曲線を作成している。

表 A2.14.1 J- $\Delta a$  モデルを設定するための試験片数

	照射材	非照射材	試験片総数
RPV 溶接部	1 1 9	1 9 8	3 1 7
RPV 母材	2 5	1 1 9	1 4 4
配管溶接部		2 2	2 2
配管母材		7 1	7 1
合 計	1 4 4	4 1 0	5 5 4

このうち、RPV 母材の材質は A508 と A533B であり、 $J-\Delta a$  曲線を確立する際は温度、Cu の含有率、照射前シャルピーインパクトエネルギー CVN<sub>p</sub>、中性子照射量 ( $\phi t$ ) 及びき裂の進展量を考慮している。

J 積分に関しては、変形 J 積分 ( $J_d$ ) 及び修正 J 積分 ( $J_m$ ) の 2 つ形式で評価している。また、各評価形式に関しては、Charpy model、Cu- $\phi t$  model、CVN<sub>p</sub> model の 3 つのモデルで評価したが、CVN<sub>p</sub> model が最も予測精度が高いことが確認されている。そこで、CVN<sub>p</sub> model により標準 J-R 曲線を設定した。

#### ・RPV 溶接部の評価モデル

E.D.Eason らが RPV 溶接部について、4152 点の実験データから統計処理により  $J-\Delta a$  評価モデルを求め、変形 J 積分 ( $J_d$ ) の  $J-\Delta a$  曲線は以下のように得られている。

$$J_d = C_1(\Delta a)^{C_2} \exp[C_3(\Delta a)^{C_4}] \quad (\text{A2.4.19})$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_1 &= \exp[-4.10 - 0.710Cu(\phi_t)^{0.388} - 0.00269T + 0.123 \ln(B_n) + 1.50 \ln(CVN_p)] \\ C_2 &= 0.0770 + 0.116 \ln(C_1) - 0.102 \ln(B_n) \\ C_3 &= -0.0812 - 0.00920 \ln(C_1) - 0.0732 \ln(B_n) \\ C_4 &= -0.483 \end{aligned} \quad (\text{A2.4.20})$$

また、 $T$  は温度 ( $^{\circ}F$ )、 $Cu$  は銅の含有率 (wt%)、 $B_n$  は試験片肉厚 (in)、 $\phi_t$  は中性子照射量 ( $10^{18}n/cm^2$ )、 $CVN_p$  は照射前シャルピーインパクトエネルギー (ft-lb) で、また J 積分の単位は kip-in/in<sup>2</sup> である。

修正 J 積分 ( $J_m$ ) の  $J-\Delta a$  曲線は以下のように得られている。

$$J_m = C_1(\Delta a)^{C_2} \quad (\text{A2.4.21})$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_1 &= \exp[-2.92 - 1.03Cu(\phi_t)^{0.353} - 0.00234T + 1.28 \ln(CVN_p)] \\ C_2 &= 0.363 + 0.0725 \ln(C_1) - 0.115Cu(\phi_t)^{0.353} \end{aligned} \quad (\text{A2.4.22})$$

である。

#### (2) RPV 母材の評価モデル

母材について、2295 点の実験データから  $J-\Delta a$  曲線を求めており、変形 J 積分 ( $J_d$ ) に関して以下のように表せる。

$$J_d = C_1(\Delta a)^{C_2} \exp[C_3(\Delta a)^{C_4}] \quad (\text{A2.4.23})$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \exp[-2.53 + 1.15 \ln(CVN_p) - 0.00270T + 0.0760 \ln(B_n) - 0.0104\phi_i] \\
 C_2 &= 0.0770 + 0.116 \ln(C_1) - 0.0367 \ln(B_n) \\
 C_3 &= -0.0812 - 0.00920 \ln(C_1) - 0.0263 \ln(B_n) \\
 C_4 &= -0.408
 \end{aligned}
 \tag{A2.4.24}$$

である。

修正 J 積分 ( $J_m$ ) の J- $\Delta a$  曲線は以下のように表せる。

$$J_m = C_1 (\Delta a)^{C_2} \tag{A2.4.25}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \exp[-0.0945 + 0.686 \ln(CVN_p) - 0.00258T - 0.0109\phi_i] \\
 C_2 &= 0.678 + 0.120 \ln(C_1) - 0.0944 \ln(CVN_p)
 \end{aligned}
 \tag{A2.4.26}$$

である。

以上の評価式のうち、適用範囲の広さから修正 J 積分 ( $J_m$ ) の J- $\Delta a$  曲線を用いることとし、これを PASCAL に取り入れた。このうち、溶接部に関する評価式 (A2.4.21) の標準偏差は 0.187、母材に関する評価式 (A2.4.25) の標準偏差は 0.145 である。また、上記評価式の影響因子の標準値を以下のように設定されている。

$$CVN_p = 100 \text{ ft-lbs} = 135.58 \text{ J}$$

$$Cu = 0.20\%$$

$$T = 390 \text{ }^\circ\text{F} = 198.89 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$B_n = 0.8 \text{ in} = 20.32 \text{ mm}$$

ここで、式 (A2.4.3) 及び式 (A2.4.4) に示す溶接部に関する評価モデルを日本国内評価式<sup>28)</sup>と比較した。計算条件を日本国内データの標準条件とした。すなわち、

$$CVN_p = 191 \text{ J}$$

$$Cu = 0.09\%$$

である。

J から  $K_{\Omega}$  の換算は以下の式を適用している。

$$K_{\Omega} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} J(\Delta a) \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{A2.4.27}$$

ここで、

$$E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

としている。

150°Cにおける国内データによる評価式と米国データによる評価式の比較を図 A2.14.4、250°Cの比較を図 A2.14.5 に示す。同じ計算条件を用いても、破壊靱性の値が異なることが分かる。



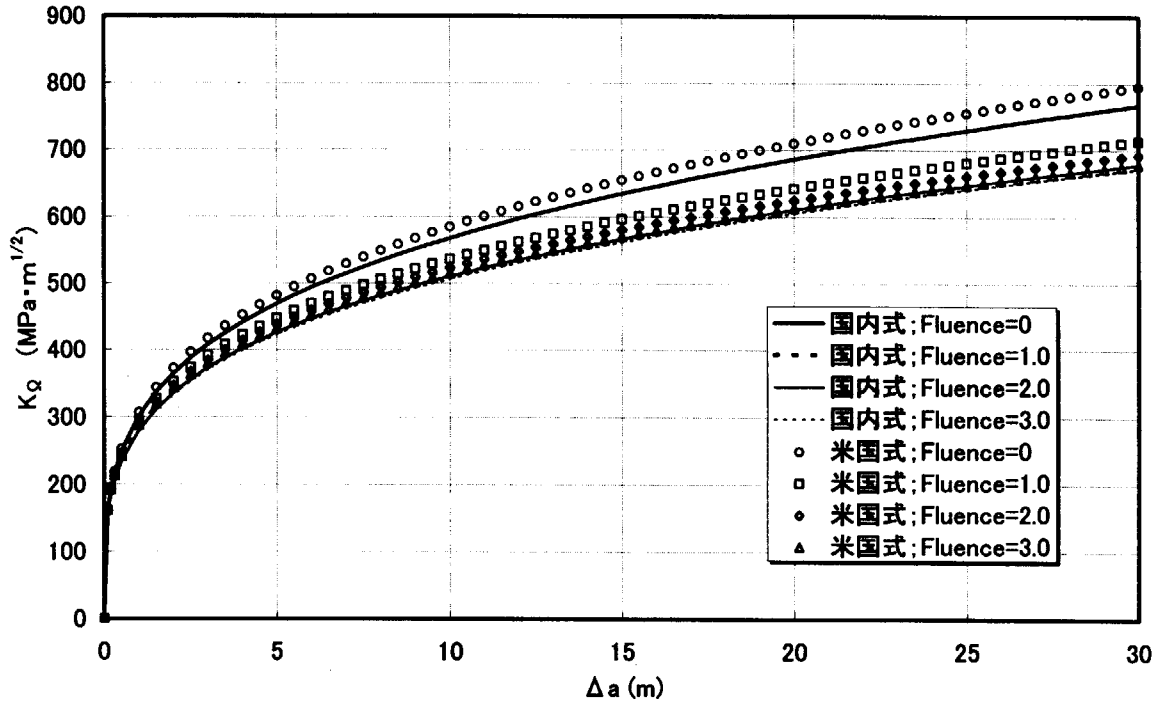


図 A2.14.4 150°Cにおける日本国内評価式と米国の評価式の比較

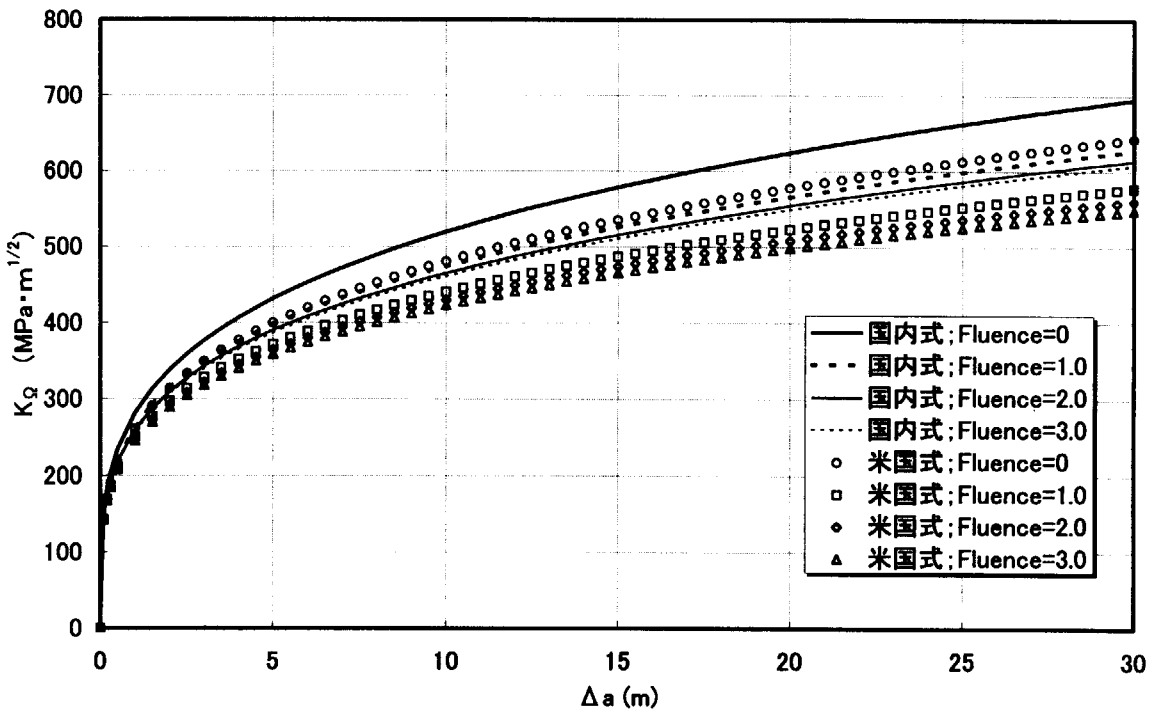


図 A2.14.5 250°Cにおける日本国内評価式と米国の評価式の比較

(3)解析例

NRC/EPRI ベンチマーク解析の A5 問題の解析条件を用いて破壊基準及び J-R 曲線の違いに関する比較を行った。評価対象を溶接部とし、米国の J- $\Delta a$  曲線の標準偏差を 0.187、評価式の影

響因子  $CVN_p$  を標準値の 135.58J とした。また、日本国内の評価式との比較計算も行い、国内の

$K_Q - \Delta a$  曲線の標準偏差を 0.1、評価式の初期上部棚エネルギー  $UUS$  を標準値の 191J とした。

計算は、これまでの知見に踏まえき裂進展刻みを 0.1mm、時間刻みを 1.0min、偏差再計算方式を FAVOR 方式、 $K_{Ic} - K_{Ia}$  偏差の相関係数を 1.0 とした。また、 $J - \Delta a$  曲線の評価モデルについては、 $\Delta a$  が 30mm よりも大きい場合の  $J$  の値を全て 30mm のときの値とした。

解析結果を表 A2.14.2 及び表 A2.14.3 及び図 A2.14.6、図 A2.14.7 に示す。

き裂進展確率に関する解析結果では、R6 法の各種カテゴリーによるき裂進展確率は全体的に  $K_{Ic} - K_{Ia}$  破壊基準によるき裂進展確率より高い。これは、R6 法を用いる場合は  $K_r$  パラメータには 2 次応力に対する補正係数が入っていることと、R6 法の破壊曲線が塑性崩壊パラメータ  $L_r$  によって低下することによるものである。また、R6 法を用いる場合は、カテゴリー 1 のみを用いるよりも、カテゴリー 1,3 を用いる場合がき裂進展確率が高い。これは今回の解析条件ではカテゴリー 3 を用いる場合の破壊靱性が高温域でカテゴリー 1 の破壊靱性よりも低いことによるものである。過渡事象の初期の 20 分でのカテゴリー 1 の破壊靱性  $K_{Ic}$  とカテゴリー 3 の破壊靱性  $K_{0.2}$  の比較を図 A2.4.8 に示す。

さらに、カテゴリー 1,3 を用いる場合でも、米国の評価式を用いる場合のき裂進展確率は国内評価式を用いる場合のき裂進展確率より高いことが確認できる。これは、国内評価式による破壊靱性  $K_{0.2}$  が米国評価式による破壊靱性  $K_{0.2}$  より低いことによるものである。

破壊確率に関しては、R6 法のカテゴリー 1 のみを用いる場合は  $K_{Ic} - K_{Ia}$  破壊基準よりも高い破壊確率を示しており、これはき裂進展確率の場合と同じ理由による。一方、カテゴリー 1,3 を用いる場合は破壊確率が著しく低減されていることが確認できる。これは亀裂進展にともない破壊抵抗  $J - \Delta a$  曲線の増大する効果が解析に反映されるためである。

表 A2.14.2 A5 問題のき裂進展確率

フルエンス ( $\times 10^{19}n/cm^2$ )	き裂進展確率			
	$K_{Ic} - K_{Ia}$ 破壊基準	カテゴリー 1 のみ	カテゴリー 1, 3 国内評価式	カテゴリー 1, 3 米国評価式
0.5	3.196E-2	5.402E-2	5.900E-2	6.088E-2
1.0	1.736E-1	2.343E-1	2.361E-1	2.364E-1
2.0	3.452E-1	4.129E-1	4.148E-1	4.156E-1
3.0	4.250E-1	4.964E-1	4.941E-1	4.946E-1

表 A2.14.3 A5 問題の破壊確率

フルエンス ( $\times 10^{19}n/cm^2$ )	破壊確率			
	$K_{Ic} - K_{Ia}$ 破壊基準	カテゴリー 1 のみ	カテゴリー 1, 3 国内評価式	カテゴリー 1, 3 米国評価式
0.5	3.195E-2	5.401E-2	1.000E-7	2.600E-6
1.0	1.736E-1	2.342E-1	2.330E-5	7.897E-4
2.0	3.452E-1	4.128E-1	4.840E-3	4.855E-2
3.0	4.250E-1	4.964E-1	3.866E-2	1.813E-1

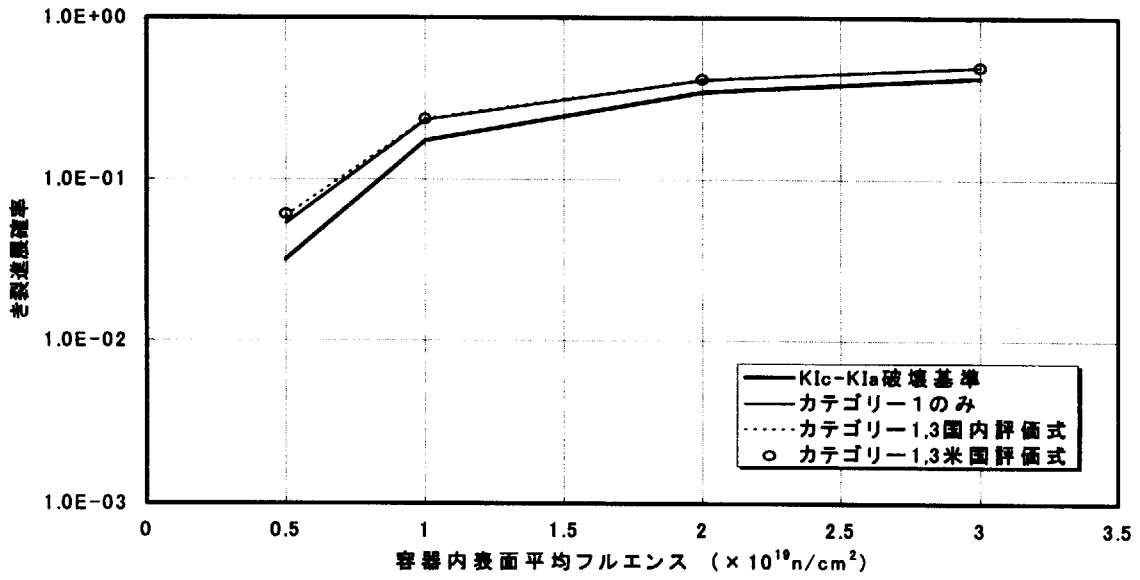


図 A2.14.6 A5 問題のき裂進展確率

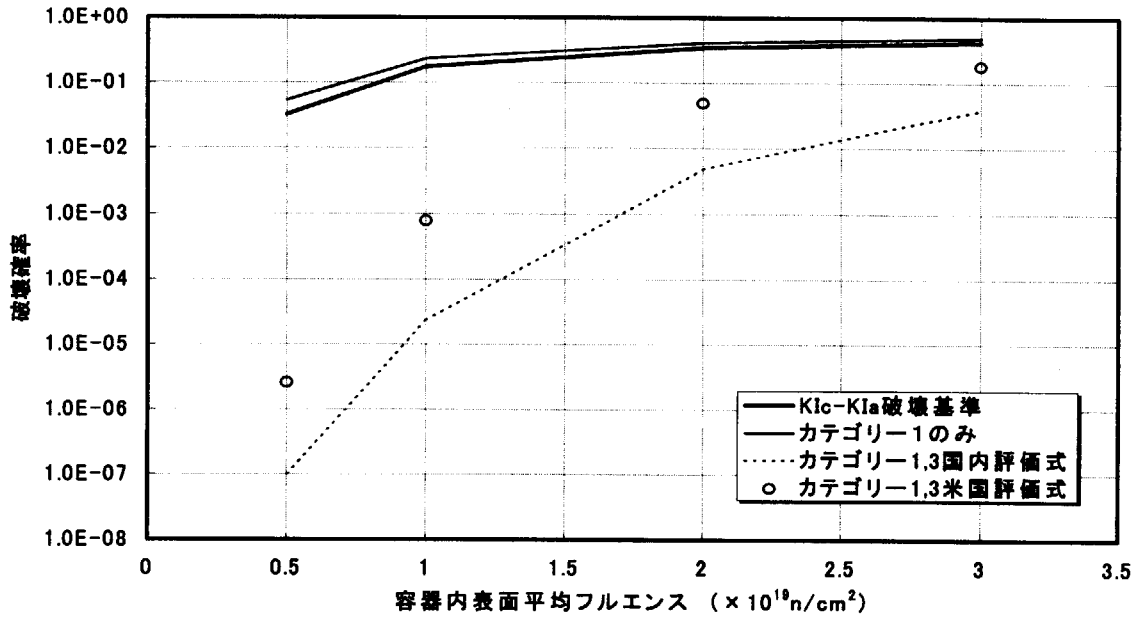


図 A2.14.7 A5 問題の破壊確率

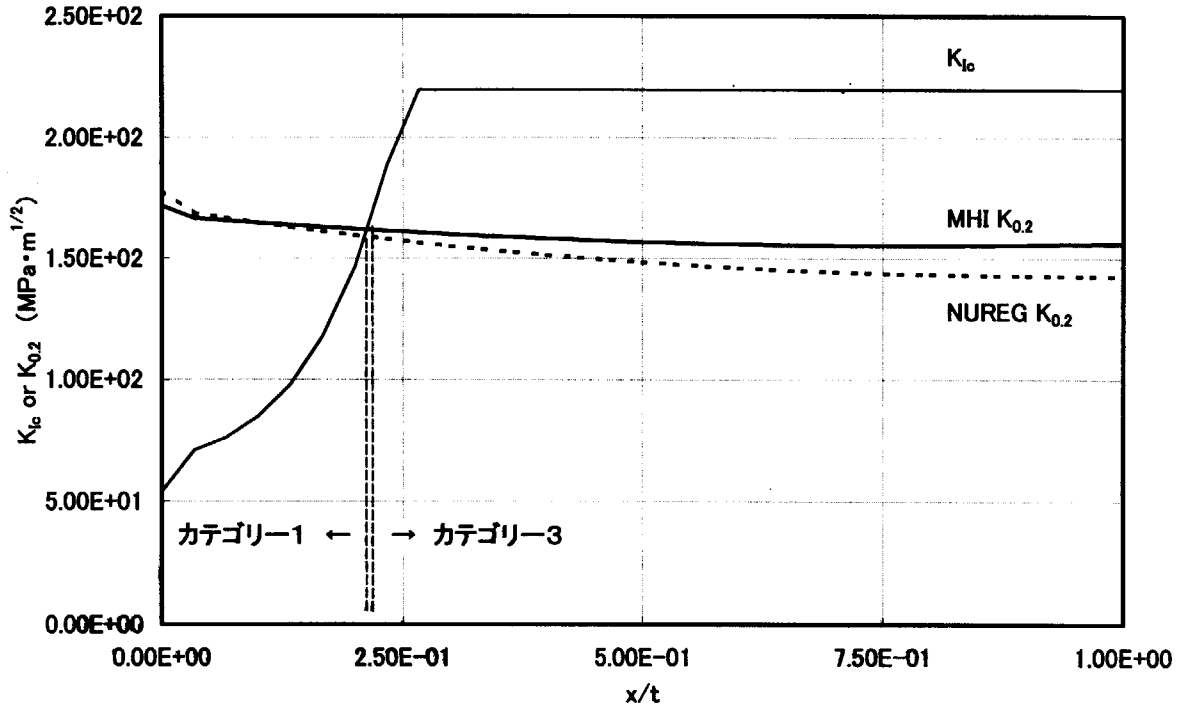


図 A2.14.8 R6 法を用いる場合の各解析ケース K<sub>0.2</sub> 及び K<sub>Ic</sub> の比較 (20 分)

#### A2.14.5 カテゴリー1とカテゴリー3の切り替えについて

解析カテゴリーは、ユーザがカテゴリー1, 2, 3の中から選択するか、破壊モードに応じてカテゴリー1, 2または1, 3から自動選択される。自動選択時の破壊モードは $T - RT_{NDT}$ により決定され、 $T - RT_{NDT}$ が入力値よりも小さい場合はカテゴリー1を使用し、 $T - RT_{NDT}$ が入力値より大きい場合はカテゴリー2または3を使用する。

カテゴリーの自動切り替えに伴う $K_{mat}$ の評価手法の1例を図A2.14.9に示す。

き裂の進展開始直後は、容器内表面付近の温度の低い部分にき裂が位置しているため、 $T$ は低い。また中性子照射量が多いため、 $RT_{NDT}$ は高めである。よって $T - RT_{NDT}$ は小さい可能性が高い。入力されたしきい値よりも小さくなった場合は、カテゴリー1が選択される。

き裂が進展していくにつれて、き裂先端の温度は上昇し、中性子照射量は減衰するため $T - RT_{NDT}$ は次第に高くなることが考えられる。 $T - RT_{NDT}$ が入力されたしきい値よりも高くなると、カテゴリーは2または3に切り替えられる。

その後の $K_{mat}$ の値は $K_{\Omega}(\Delta a_j)$ または $K_g$ から算出されるが、ここでの $\Delta a_j$ はき裂の全進展量ではなく、カテゴリーが2または3に切り替えた後のき裂進展量であることに注意されたい。

カテゴリー2または3において、き裂が進展するにつれて $K_{mat}$ は増加していく。 $K_{mat}$ の増加が $K_I$ の増加よりも大きい場合は、 $K_r$ は基本的に減少する。 $K_r$ の減少が大きい場合は、き裂進展が停止することもある。

き裂進展停止中は、時刻の経過によって温度が低下していくことが考えられる。そのため $K_{mat}$ は減少していく。 $K_r$ が増加するなら、き裂が再進展することもある。き裂が再進展するかどうかの判定には、カテゴリー切り替えの前の $K_{mat}$ が使用される。

き裂の再進展が始まった後、 $T - RT_{NDT}$ の値によってカテゴリーが1になる場合と2または3になる場合がある。カテゴリーが2または3になる場合は、 $K_{mat}$ の値に $K_{\Omega}(\Delta a_j)$ または $K_g$ を使用し、カテゴリーが1になる場合は、 $K_{mat}$ の値に $K_c$ 、 $K_{0.2}$ のいずれかを使用する。

再進展後のカテゴリーが1の場合は、き裂がさらに進展するとカテゴリーが2または3に切り替わる可能性がある。 $T - RT_{NDT}$ の値がしきい値を上回ってカテゴリーが切り替わった場合、 $K_{mat}$ を決定するための $\Delta a_j$ はカテゴリーが切り替わった位置を0.0として再計算される。

R6法によるき裂進展・破壊評価の1例を図A2.14.10に示す。

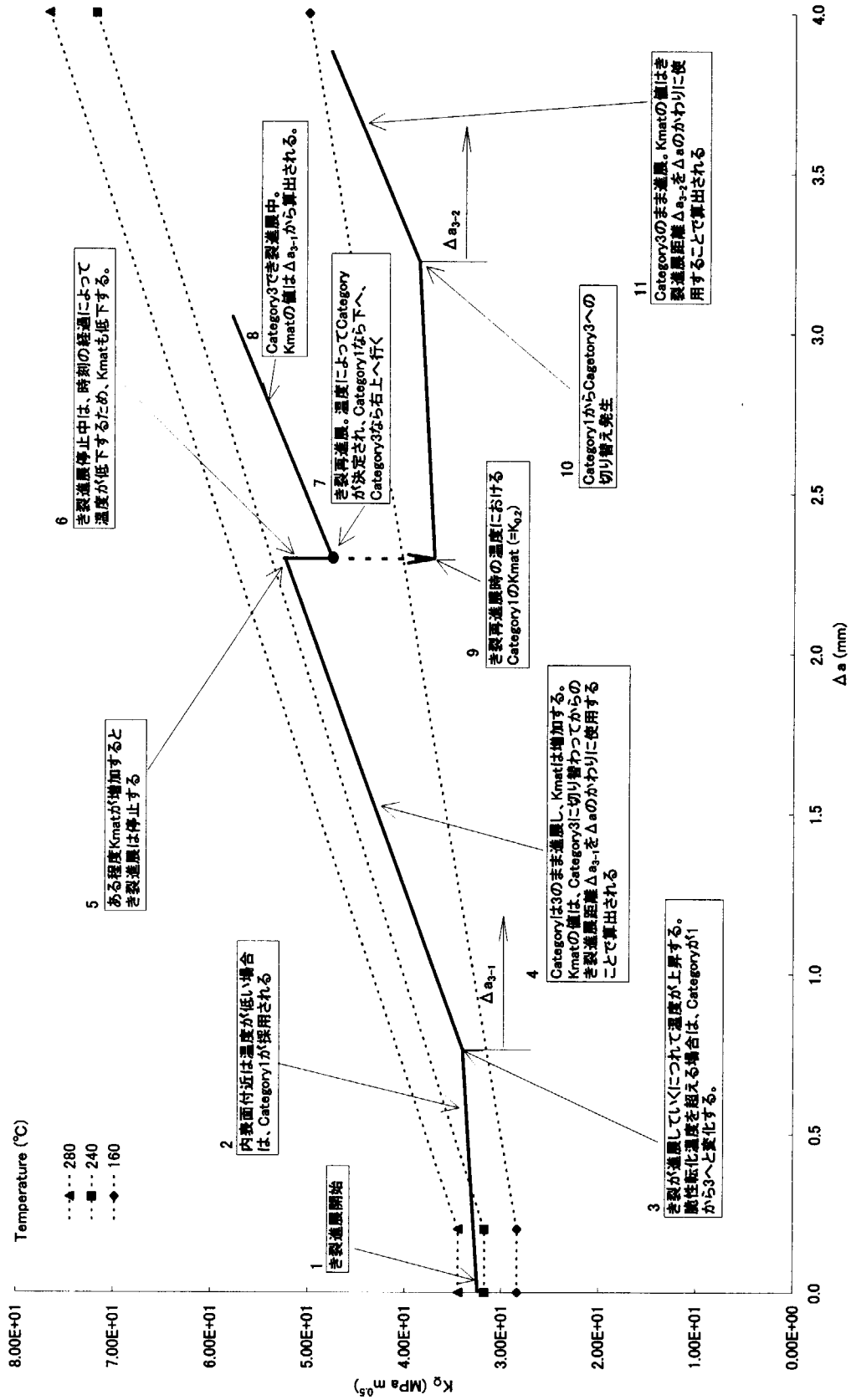


図 A2.14.9 カテゴリー1、3 切り替え時の K<sub>mat</sub> の値の 1 例

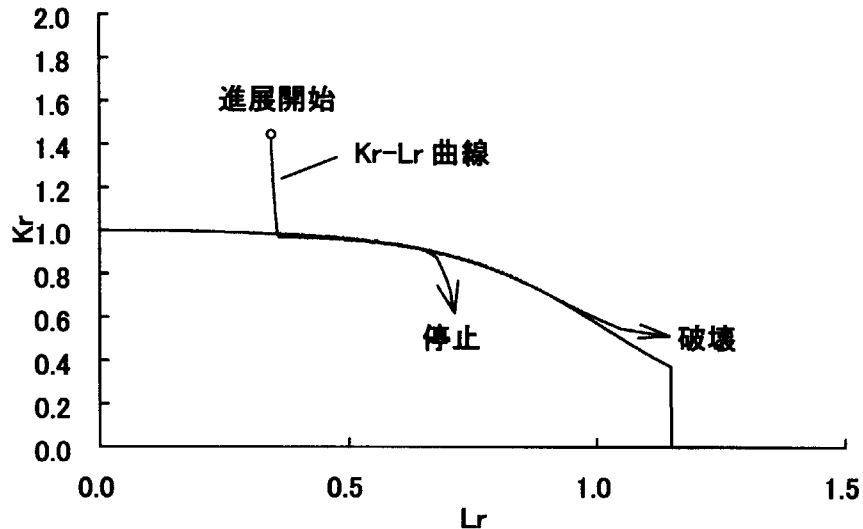


図 A2.14.10 R6法を用いた評価例

### A2.15 き裂進展刻みの計算方式

き裂進展が開始する場合、ユーザ入力したき裂進展刻みに従って進展し、き裂の寸法を増分計算していく。き裂進展刻みが小さければ計算精度が高いが、計算時間がかかる。これに対して、PASCALは以下の2種類の進展計算方式を用意している。

- ・等間隔進展方式
- ・等比級数進展方式

#### (1) 等間隔進展方式

き裂は等間隔進展方式に従って進展する場合は、き裂の進展刻みはユーザによって入力する必要がある。き裂が進展していくたびにこの進展量を加算し新たなき裂寸法を計算していく。

#### (2) 等比級数進展方式

き裂は等比級数進展方式に従って進展する場合は、き裂の初期進展刻みと等比級数の増幅率はユーザによって入力する必要がある。き裂が進展していくたびに等比級数に従って、新たな進展量を計算しき裂の寸法を加算していく。

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつ SI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238869	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

確率論的破壊力学コードPASCALの開発と使用手引き