



JAEA-Data/Code

2006-001



JP0650287

減肉配管構造信頼性解析コード PASCAL-EC の使用手引き

User's Manual of PASCAL-EC for Evaluating Structural
Reliability of Piping with Wall Thinning

伊藤 裕人 加藤 大輔* 鬼沢 邦雄 柴田 勝之
Hiroto ITOH, Daisuke KATO*, Kunio ONIZAWA and Katsuyuki SHIBATA

安全研究センター
機器・構造信頼性評価研究グループ
Reactor Component Reliability Research Group
Nuclear Safety Research Center

JAEA-
Data/Code

February 2006

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

減肉配管構造信頼性解析コード PASCAL-EC の使用手引き

日本原子力研究開発機構安全研究センター

原子炉施設安全評価研究ユニット

伊藤 裕人*・加藤 大輔*・鬼沢 邦雄・柴田 勝之

(2006年1月4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、流動加速腐食(FAC)による減肉配管の破損に対する構造信頼性学解析コードである PASCAL-EC (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR - Erosion Corrosion)を開発した。

このコードは、炭素鋼配管が FAC により減肉した場合の破損確率をモンテカルロ法により評価するものである。PASCAL-EC は経年劣化事象として減肉を対象としており、近年の試験・研究結果を反映した最近の破壊判定法が盛り込まれている。本報告書は、PASCAL-EC の使用方法と解析理論及び手法をまとめたものである。

原子力科学研究所(駐在)：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※ (株)アドバンストアルゴリズム&システムズから出向中

* みずほ情報総研株式会社

User's Manual of PASCAL-EC for Evaluating Structural Reliability of Piping with Wall Thinning

Hiroto ITOH[※], Daisuke KATO*, Kunio ONIZAWA and Katsuyuki SHIBATA

Reactor Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2006)

As a part of the aging and structural integrity research for LWR components, new probabilistic fracture mechanics (PFM) analysis code PASCAL-EC (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – Erosion/-Corrosion) has been developed. This code evaluates the failure probability of an aged piping with a wall thinning by Monte Carlo method. PASCAL-EC treats the wall thinning due to erosion/corrosion or flow accelerated corrosion (FAC) in piping. The development of this code has been aimed to improve the accuracy and reliability of analysis by introducing new analysis methodologies and algorithms considering the recent developments in the structural mechanics and aging researches.

This report provides the user's manual and theoretical background of PASCAL-EC.

Keywords: Probabilistic Fracture Mechanics, Structural Integrity, Failure Probability, Erosion/-Corrosion, FAC

※ On loan from Advanced Algorithm & Systems
* Mizuho Information & Research Institute

目 次

1	はじめに	1
2	評価内容及び解析手法	2
2.1	評価内容	2
2.2	解析モデル	2
3	プログラムの流れ	13
4	プログラム動作環境	15
5	使用マニュアル	16
5.1	入力データの指定方法	16
5.2	プログラム実行方法	26
5.3	解析結果の出力	26
5.4	サンプル問題	30
6	まとめ	32
	謝辞	32
	参考文献	33

Contents

1	Introduction	1
2	Basic Theories and Methodologies	2
2.1	Evaluation Contents	2
2.2	Analysis Model of PASCAL-EC	2
3	Analysis Flow	13
4	Specification of Hard Ware	15
5	User's Manual	16
5.1	Generation of Input Data	16
5.2	Program Execution	26
5.3	Output Results	26
5.4	Sample Problem	30
6	Summary	32
	Acknowledgement	32
	References	33

表 リスト

表 2-1	PASCAL-EC の主な評価内容	2
表 2-2	幾何学形状ファクター k_c	4
表 2-3	確率変数 E のパラメータ	5
表 2-4	確率変数 E のパラメータ(1 領域)	7
表 3-1	計算の流れ	14
表 4-1	プログラム動作環境	15
表 5-1	入力カード一覧	16
表 5-2	解析結果出力ファイル	26
表 5-3	解析条件出力ファイル例	27
表 5-4	解析結果出力ファイル例	29
表 5-5	減肉量出力ファイル・ファーマット	29
表 5-6	サンプル問題パラメータ設定値	30

図 リスト

図 2-1	KWU-KR 評価モデルによる減肉率の実測値(横軸)に対する計算値(縦軸) ⁴⁾	6
図 2-2	単相流における減肉率の実測値(横軸)に対する予測値(縦軸) ⁴⁾	7
図 2-3	組合せ荷重を考慮した崩壊評価式と実験観測データの比較 ¹¹⁾	10
図 3-1	フローチャート	13
図 5-1	減肉率モデルが破損確率に及ぼす影響	31
図 5-2	破壊クライテリアが破壊確率に及ぼす影響	31

1 はじめに

軽水型原子プラントの長期運転に対するニーズが増大する中で経年構造機器の健全性確保を図ることが、今日、きわめて重要な課題となっている。

構造機器の信頼性評価には、より合理的な評価手法として確率論的破壊力学(PFM)解析手法が用いられる動向にあり、その有用性が示されている¹⁾。日本原子力研究開発機構においても PFM 解析コードの整備を進め、これまでに原子炉圧力容器を対象とした PASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR)²⁾や、配管を対象として SCC を考慮した PASCAL-SC (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – Stress Corrosion Cracking) 及び地震荷重による疲労き裂進展を考慮した PASCAL-EQ (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – EarthQuake)³⁾を開発してきた。

米国サリー発電所 2 号機における給水管破断事故(1986)や関西電力・美浜発電所 3 号機 2 次系配管破損事故(2004)等は配管の減肉が原因で起きたものであり、構造機器の信頼性評価において重要な劣化要因の一つである。そこで、経年劣化事象として減肉を対象に配管の信頼性を PFM 解析手法でより精度良く評価するために、最近の破壊クライテリア等を盛り込んだ PFM 解析コード PASCAL-EC (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – Erosion Corrosion)を開発した。

本報告書では、PASCAL-EC の解析モデル及び使用方法を述べる。

2 評価内容及び解析手法

PASCAL-EC の評価内容・特徴及び基礎理論・解析手法の概略を以下に示す。

2.1 評価内容

PASCAL-EC の主な評価内容を表 2-1 に示す。

表 2-1 PASCAL-EC の主な評価内容

評価項目	内容	
解析対象	配管の破損確率	
劣化事象	減肉による配管肉厚の減少	
減肉	減肉評価式	KWU-KR モデル(Kastner の減肉評価式)
確率計算	確率変数	水環境：流速、PH、水温、酸素濃度等 材料：クロム・モリブデン含有量、密度、密度、引張強さ等 形状：配管初期肉厚、減肉角度等
	確率計算手法	階層別モンテカルロ法(引張強さ、減肉角度)
	負荷応力	運転応力(内圧、1 次曲げ応力)、地震応力
破壊力学評価	破壊クライテリア	内圧によるバースト : Wesley の式 実断面応力基準 : 宮崎の式 内圧・実断面応力基準 : 原研の式、Kanninen の式 ラチエット・疲労損傷 : Coffin, 朝田の式

※供用期間中検査による補修・交換は考慮しない。

2.2 解析モデル

PASCAL-EC に導入した減肉評価式及び破壊クライテリアの概略を以下に述べる。

2.2.1 減肉評価式

高温高圧の水及び蒸気が高い速度で管内を流れることによって配管が減肉される現象は FAC (flow-accelerated corrosion) と呼ばれる。以前はエロージョン・コロージョン(EC)と呼ばれていた。FAC は、キャビテーションや液滴衝突により生じるエロージョンと区別され、流動高温水中における鉄の電気化学反応により生じる減肉である。FAC は高速の高温水が流れる炭素鋼配管で主に発生する。配管内面に形成される鉄の酸化皮膜(主にマグネタイト(Fe_3O_4)またはヘマタイト(Fe_2O_3))の安定性と関係する。基本メカニズムは鉄の水中への溶解であり、表面に形成される酸化皮膜の形勢と関係する。

2.2.1.1 KWU-KR モデル

ドイツのシーメンス社 KWU の Kastner らは、減肉のメカニズムを考察し、KWU-KR モデルと呼ばれる減肉評価モデルを提案した^{4),5)}。このモデルでは EC (Erosion/Corrosion) によって減肉が進行する配管の肉厚 $W_c(t)$ を次のように表している。

$$W_c(t) = \frac{\Delta\varphi_R t}{\rho_{st}} \quad (2-1)$$

ここで、

$\Delta\varphi_R$: 減肉率 ($\mu \text{ g/cm}^2\text{hr}$),

t : 露出時間 (hr)

ρ_{st} : 鉄の密度 ($\mu \text{ g/cm}^3$).

である。

上記式を用いれば、減肉を考慮した配管の肉厚は時間の関数となり、次のように計算される。

$$W_{pipe}(t) = W_{original} - W_{c,calculated}(t) \quad (2-2)$$

ただし、

$W_{pipe}(t)$: 時刻 t における配管肉厚(cm)

$W_{original}$: 初期の肉厚(cm)

$W_{c,calculated}(t)$: 時刻 t における減肉量計算値(cm).

である。

Kastner らによれば減肉率は次のように評価される。

$$\Delta\varphi_R = 6.25k_c \left(B e^{Nw} [1 - 0.175(pH - 7)^2] [1.8 e^{-0.118g} + 1] f(t) \right) \quad (2-3)$$

ここで、

$$B = -10.5\sqrt{h} - (9.375 \times 10^{-4} T^2) + (0.79 T) - 132.5 \quad (2-4)$$

$$N = -0.0875 h - (1.275 \times 10^{-5} T^2) + (1.078 \times 10^{-2} T) - 2.15 \quad (0\% \leq h \leq 0.5\%) \quad (2-5)$$

$$N = (-1.29 \times 10^{-4} T^2 + 0.109 T - 22.07) 0.154 e^{-1.2 h} \quad (0.5\% \leq h \leq 5\%) \quad (2-6)$$

である。また、

k_c : 總合形状ファクター

w : 流速(m/s)

pH : pH 値

g : 溶存酸素濃度 ($\mu \text{ g/kg}$)

h : クロムとモリブデンの含有量 (%)

T : 溫度(K)

$f(t)$: 時間にに対する修正ファクター

である。このうち、時間に対する修正ファクター $f(t)$ は次のように与えられている。

$$f(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 \quad (2-7)$$

ここで、

t	: 露出時間(hr)
C_1	: 9.999934×10^{-1}
C_2	: -3.356901×10^{-7}
C_3	: $-5.624812 \times 10^{-11}$,
C_4	: 3.849972×10^{-16} .

である。ただし、 $f(t)$ は十分時間が経つと非常に大きな値となるため、 $t > 9.6 \times 10^4$ 時間（約 11 年）の範囲では、 $f(t) = 0.79$ で一定とする。幾何学形状ファクター k_c は管の形状に応じて表 2-2 ように与えられている^{4),6)}。

2 相流における EC の場合は減肉率の計算は配管内表面の水膜の平均速度を用いて行われる。この平均速度 W_F は次のように計算される。

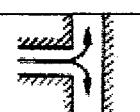
$$W_F = \frac{\dot{m}}{\rho_w} \frac{1-x_{st}}{1-\alpha} \quad (2-8)$$

ただし、

\dot{m}	: 質量流速($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)	ρ_w	: 飽和水の密度(kg/m^3)
x_{st}	: 蒸気クオリティ	α	: ポイド率

である。

表 2-2 幾何学形状ファクター k_c

幾何学形状	k_c	備考
配管上、羽根上、プレート上	1.0	
直管	0.04	
結合部	0.15	
R/D=2.5 の曲管	0.23	R:曲率半径 D:管径
R/D=1.5 の曲管	0.30	
R/D=0.5 の曲管	0.52	
漏りやすい継手	0.08	
配管入り口	0.16	
羽根区域	0.30	
#1 分岐 (オリフィス後部)	0.75	
#2 分岐	0.60	

2.2.1.2 減肉評価式の確率論的評価モデル

Kastner らは減肉率評価モデルについて、その計算値(予測値)と実験観測値の比較検討を行った(図 2-1)⁴⁾。図中には 1049 点のプラントの実測データまたは実験室の実験データが含まれている。図 2-1からも確認できるように、KWU-KR モデルの予測値はばらつきが大きい。そのため、Smith らは KWU-KR モデルによる予測値について統計処理を行い減肉率の確率論的評価モデルを提案した⁶⁾。

確率論的評価モデルでは、減肉率は以下のように計算される。

$$\Delta\varphi_R = \Delta\varphi_{R,KWU-KR} \times E \quad (2-9)$$

ここで、

- $\Delta\varphi_R$: 確率モデルで算出される減肉率 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$)
- $\Delta\varphi_{R,KWU-KR}$: 決定論 KWU-KR モデルによる減肉率($\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$)
- E : 対数正規分布に従う確率変数

である。

また、(2-1)式に対応した減肉量の確率論的評価モデルは次式のようになる。

$$W_{c,calculated}(t) = \frac{E(\Delta\varphi_{R,KWU-KR})t}{\rho_{st}} \quad (2-10)$$

確率変数 E の確率論的評価モデルは図 2-1に示す 4 つの領域(Region I~IV)に区分して対数正規分布が設定されており、各領域で平均値及び標準偏差が表 2-3に示すように指定されている。

尚、本コードには図 2-1に示す 4 つの領域 (Region I~IV)をまとめて 1 つの領域として対数正規分布を設定し確率変数 E を評価する機能を追加している。図 2-1に示す単相流及び 2 相流の全データと図 2-2に示す単相流についてのデータ^{4),6)} (菱形プロット) をそれぞれ統計処理して求めた平均値と標準偏差を表 2-4に示す。

表 2-3 確率変数 E のパラメータ

パラメータ	Region I	Region II	Region III	Region IV
平均値 μ	0.33	-1.17	-0.72	-2.03
標準偏差 σ	1.17	1.15	1.04	1.65

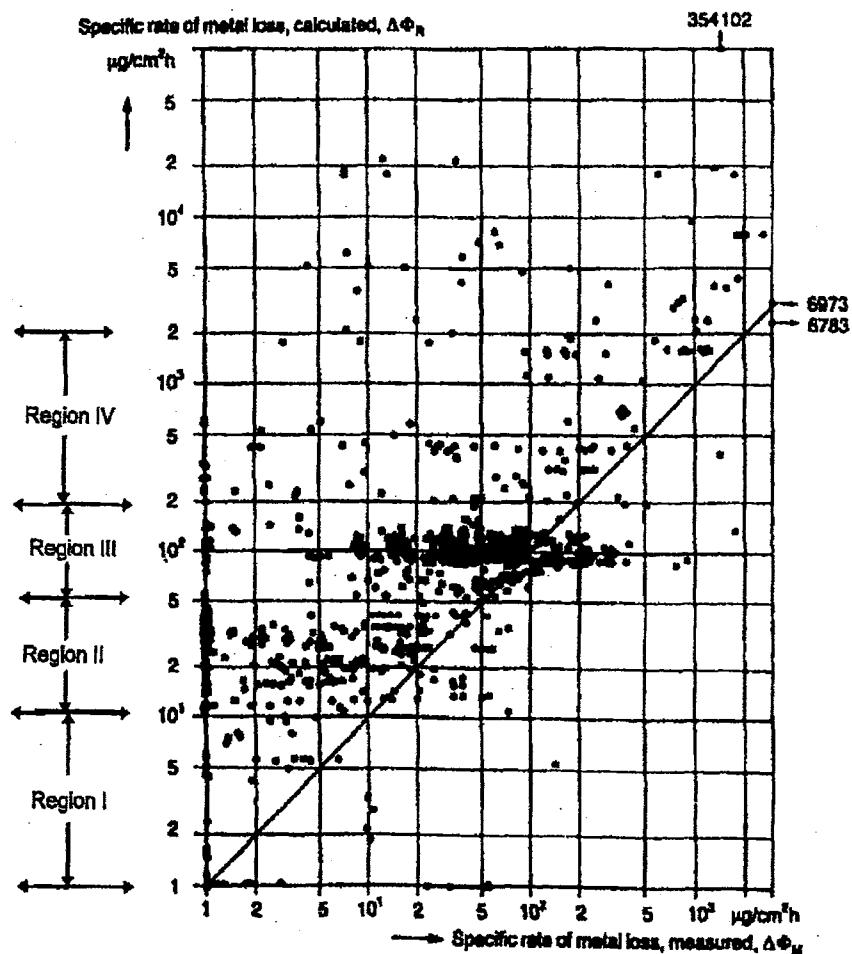


図 2-1 KWU-KR 評価モデルによる減肉率の実測値(横軸)に対する計算値(縦軸)⁴⁾
及び Smith らによる領域分割⁶⁾

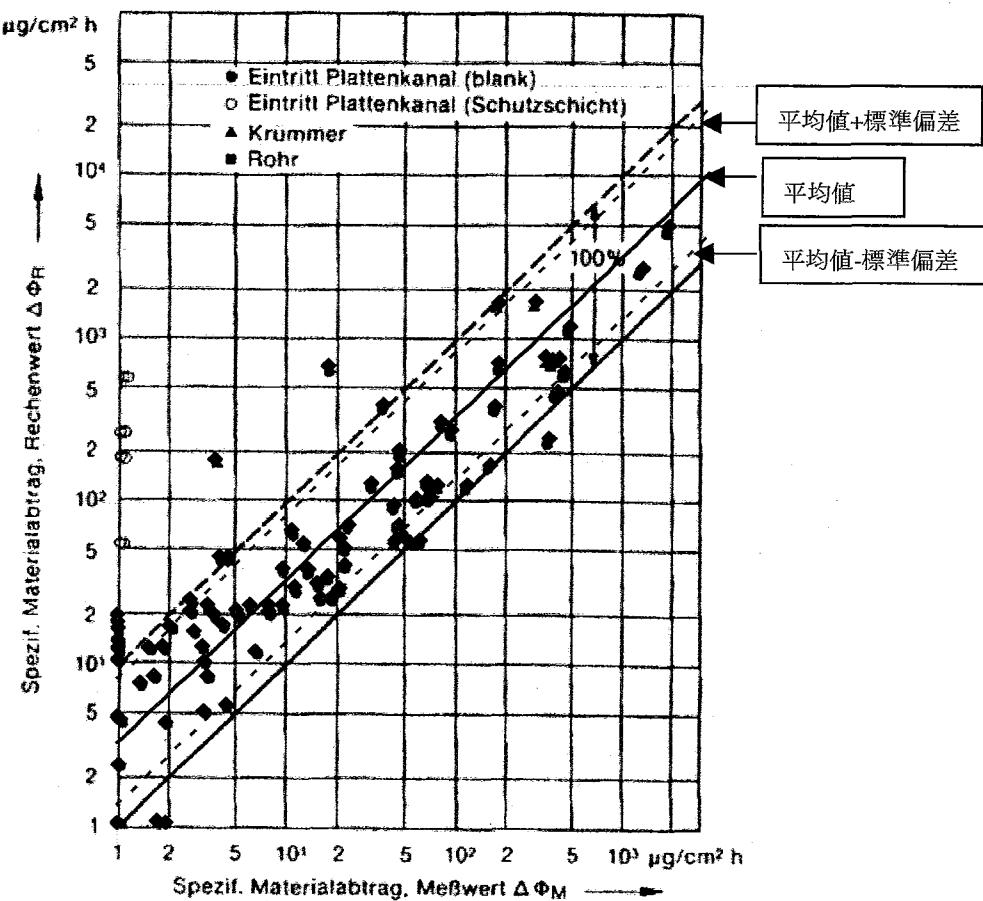


Bild 6. Vergleich zwischen KWU-Messungen und Rechnungen mit dem empirischen Modell.

図 2-2 単相流における減肉率の実測値(横軸)に対する予測値(縦軸)⁴⁾

表 2-4 確率変数 E のパラメータ(1 領域)

パラメータ	単相流及び 2 相流	単相流
平均値 μ 標準偏差 σ	0.6737 1.14	-1.1503 0.8858

2.2.2 破壊クライテリア

2.2.2.1 Wesley の破壊クライテリア

Wesley は様々な温度条件において SA516Grade70 炭素鋼直管について内圧による配管の破壊実験を実施し、配管のバースト圧力評価式を以下のように与えている⁷⁾。

$$ps_f(t) = \frac{\sigma_f \cdot W_{pipe}(t)}{[r + W_{c,calculated}(t)][1 + 0.25\varepsilon_f]} \quad (2-11)$$

ここで

$ps_f(t)$: 配管の破損圧力(ksi)
σ_f	: 材料の破壊応力(ksi)
$W_{pipe}(t)$: 時刻 t での配管肉厚(cm)
r	: 初期内半径(cm)
$W_{c,calculated}(t)$: 肉厚減少量(cm)
ε_f	: 周方向平均破損ひずみ(炭素鋼の場合、3.7%)

である。

2.2.2.2 塑性崩壊クライテリア

塑性崩壊クライテリアは、周方向未貫通き裂を有する延性材配管の破壊を評価する場合に適用される破壊基準である。配管のき裂部における実断面応力が流動応力に達したときに破壊が生じるとする基準である。

Kanninen らは内圧と曲げモーメントの平衡条件から以下の塑性崩壊の式を導出している⁸⁾。

$\beta \leq \pi - \theta$ のとき、

$$M_c = 2\sigma_f R^2 t \left(2 \sin \beta - \frac{d}{t} \sin \theta \right) \quad (2-12)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{d}{t} \theta \right) - \frac{\pi}{4} \frac{Rp}{t \sigma_f}$$

$\beta > \pi - \theta$ のとき、

$$M_c = 2\sigma_f R^2 t \left\{ 2 \left(1 - \frac{d}{t} \right) \sin \beta + \frac{d}{t} \sin \theta \right\} \quad (2-13)$$

$$\beta = \pi + \frac{1}{1-d/t} \left(\frac{(d/t) \times \theta - \pi}{2} - \frac{\pi}{4} \frac{Rp}{t \sigma_f} \right)$$

ここで、 M_c は崩壊モーメント、 σ_f は流動応力、 R は配管の平均半径、 t は肉厚、 p は圧力、 d は減肉深さ、 θ は減肉半角度、 β は曲げモーメントに対する中立角度である。

本コードでは、き裂に対する上記の破壊評価式を減肉配管の破壊評価に適用した。なお、流動応力 $\sigma_f = \sigma_{uts}$ (材料の引張り強さ)とした。

また、宮崎らは減肉による配管肉厚の減少を考慮し、曲げモーメントのみが負荷された場合の破壊クライテリアを検証した^{9),10)}。崩壊モーメント M_c は式(2-12), 式(2-13)式の圧力 p を 0 とした式と同じである。

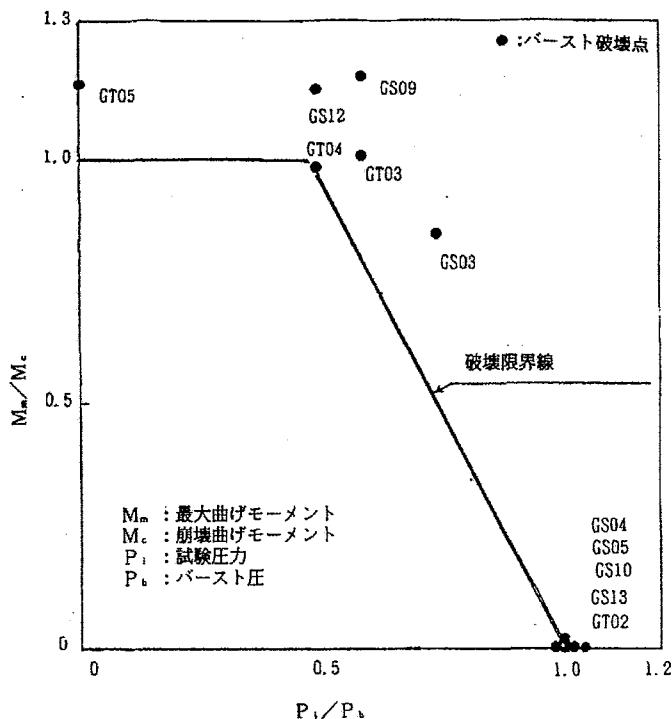
2.2.2.3 原研の破壊クライテリア

原研では、減肉配管の破壊挙動に関する研究を実施し、内圧と曲げの組合せ荷重を受ける部分における減肉配管の破壊クライテリアを考察して以下の評価式を提案した¹¹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{M_m}{M_c} &= 1 & \left(0 \leq \frac{P_i}{P_b} \leq 0.5\right) \\ 0.5 \frac{M_m}{M_c} + \frac{P_i}{P_b} &= 1 & \left(0.5 \leq \frac{P_i}{P_b} \leq 1\right) \end{aligned} \quad (2-14)$$

ここで、 M_m は曲げモーメント、 M_c は曲げのみの崩壊モーメント、 P_i は内圧、 P_b はバースト圧力である。この評価式と実測データの比較を図 2-3 に示す。

本コードには式(2-14)について、部分減肉の幾何学的関係と流動応力を考慮して曲げ崩壊モーメント M_c 及びバースト圧力 P_b を求める破壊判定を行うオリジナルの原研の式に加えて、 M_c を Wesley の式から、 P_b を Kanninen の式から求め、破壊判定を行う変形版の評価機能が導入されている。

図 2-3 組合せ荷重を考慮した崩壊評価式と実験観測データの比較¹¹⁾

2.2.2.4 ラチェット・疲労損傷による破壊クライテリア

中村らの減肉配管を用いた耐震安全裕度の研究における直管及びエルボの振動試験結果では、ラチェットを伴う疲労損傷、座屈及び疲労損傷と破裂の混在の 3 種類の破損形態が示されている¹²⁾。この中でラチェット変形が生じた場合については、累積疲労損傷則を用いたラチェット変形を伴う寿命評価法として、低サイクルラチェット疲労試験による 3 種類の実験式の適用が検討されている。

①Coffin 則¹³⁾

$$D_d + D_f = 1$$

②朝田の実験式 I¹⁴⁾

$$3D_d + D_f = 1 \quad (D_f \geq 0.25)$$

$$D_d + 3D_f = 1 \quad (D_f < 0.25)$$

③朝田の実験式 II¹⁴⁾

$$D_f + 2\sqrt{D_f D_d} + D_d = 1$$

ここで、

$$D_f = (\eta)^{0.6} \quad : \text{疲労損傷パラメータ}$$

$$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_f} \quad : \text{マイナー則に基づく損傷率}$$

$$\Delta \varepsilon_t = 0.6158 N_f^{-0.0746} + 89.08 N_f^{-0.5414} \quad : \text{STS410 に対する疲労寿命評価式}$$

$$D_d = \varepsilon_f / \varepsilon_{f_0} \quad : \text{延性消耗パラメータ}$$

$$\varepsilon_f \quad : \text{累積ひずみ量}$$

$$\varepsilon_{f_0} = \ln(100/(100-\phi)) \quad : \text{材料の真破断延性 (112.4%)}$$

$$\phi \quad : \text{破断絞り (%)}$$

STS410 に対する疲労寿命評価式において、 $\Delta \varepsilon_t$ は全ひずみ範囲を表し単位は%である。

パラメータ η を算出するためには、 $\Delta \varepsilon_t$ を既知としたうえで N_f を取得し、これを用いる必要がある。よって、STS410 に対する疲労寿命評価式の逆計算を行うのであるが、この計算が行われる回数は過渡事象数や地震波数が多い場合非常に多くなる。このため、通常は二分法等を用いて繰り返し計算を行うが、計算時間を短縮する目的で、以下に示す多項式近似により逆計算を行う方法を採用した。

$310.6017 < \Delta \varepsilon_t$ の場合

$$N_f = \left(\frac{\Delta \varepsilon_t}{89.08} \right)^{-\frac{1}{0.5414}}$$

$0.922240 < \Delta \varepsilon_t < 310.6017$ の場合

$$\begin{aligned} \ln(N_f) = & 0.000106919552 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^6 - 0.00232211926 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^5 + \\ & 0.0211433579 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^4 - 0.107067506 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^3 + \\ & 0.337706119 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^2 - 2.52261346 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\} + 8.99053494 \end{aligned}$$

$0.193467 < \Delta \varepsilon_t < 0.922240$ の場合

$$\begin{aligned} \ln(N_f) = & -0.161735339 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^6 - 0.994182822d0 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^5 - \\ & 1.75100239 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^4 - 1.7911185d0 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^3 - \\ & 0.32194585 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^2 - 2.67350432 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\} + 8.98190723 \end{aligned}$$

$0.082360 < \Delta \varepsilon_t < 0.193467$ の場合

$$\begin{aligned} \ln(N_f) = & 0.148645205 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^6 + 2.71104965d0 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^5 + \\ & 20.5163533 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^4 + 82.4788662 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^3 + \\ & 185.833156 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\}^2 + 209.182927 \{\ln(\Delta \varepsilon_t)\} + 104.292873 \end{aligned}$$

$\Delta \varepsilon_t < 0.082360$ の場合

$$N_f = \left(\frac{\Delta \varepsilon_t}{0.6158} \right)^{-1/0.0746}$$

$\Delta \varepsilon_t$ は次式を用いて算出する。

$$\Delta \varepsilon_t = \varepsilon_{m_max} + \varepsilon_{b_max} - \varepsilon_{m_min} - \varepsilon_{b_min}$$

ここで、 ε_{m_max} は最大膜応力から求めたひずみ、 ε_{b_max} は最大曲げ応力から求めたひずみ、 ε_{m_min} は最小膜応力から求めたひずみ、 ε_{b_min} は最小曲げ応力から求めたひずみである。

各ひずみの算出は、次式を用いて行う。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma - \sigma_y}{H} \quad (\sigma > \sigma_y)$$

$$\varepsilon_p = 0.0 \quad (-\sigma_y < \sigma < \sigma_y)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma + \sigma_y}{H} \quad (\sigma < -\sigma_y)$$

ここで、 ε_e は弾性ひずみ、 ε_p は塑性ひずみ、 E はヤング率、 H は加工硬化係数、 σ_y は降伏応力である。

3 プログラムの流れ

PASCAL-EC のフローチャートを図 3-1に示し、計算の流れを表 3-1にまとめる。

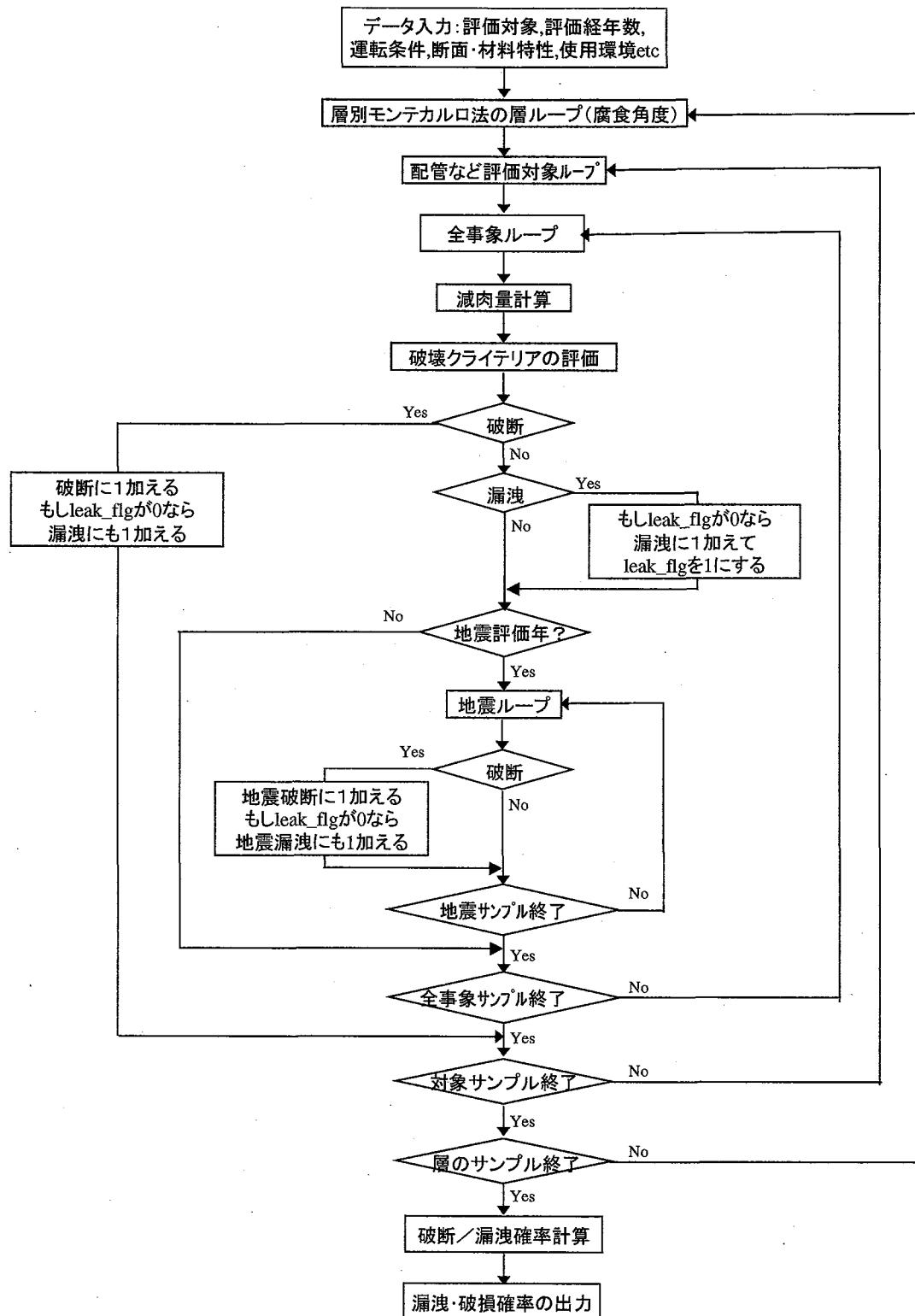


図 3-1 フローチャート

表 3-1 計算の流れ

1. 評価対象、評価経年数などの解析条件をファイルから読み込む。
2. 層別モンテカルロ法の層ループに入る。本計算では配管の腐食角度を層別とする。
3. 配管ループに入る。試行する配管の数は入力データから読み込む。
4. 全事象(運転時間)ループに入る。本計算では定常時圧力の付加も事象の一部として取り扱う。
5. 減肉率を計算して配管の減肉量を求める。
6. 破壊クライテリアにより破断判定を行う。破断したら破断フラグを立て、leak_flg が 0 でなければ漏洩フラグも立てて全事象ループを抜ける。この配管についての計算はここで終了し、以降の事象についての評価は行わない。
7. 減肉量が肉厚以上になっていたら漏洩したとみなし、leak_flg が 0 で無ければ漏洩のフラグを立て、leak_flg を 1 にする。全事象ループは抜けずに、以降の事象についても破損評価する。
8. 地震の評価年であれば地震ループへ入る。
9. 地震の破壊クライテリアにより破断判定を行う。破断したら地震破断フラグを立て、leak_flg が 0 でなければ地震漏洩フラグも立てる。
10. 全ての地震について評価したら地震ループを抜け、全事象ループへ戻る。
11. 次に起こる事象を調べ、その事象が解析時間よりも後に起こるのならば全事象ループを抜け、次の配管ループへ進む。
12. 全ての配管について評価したら、配管ループを抜け、次の層ループへと進む。
13. 全ての層について評価したら、層ループを抜け、各年の破断、漏洩確率を計算し結果を出力する。

4 プログラム動作環境

PASCAL-EC は FORTRAN77,90 で開発した。推奨するプログラムの動作環境を表 4-1に示す。

表 4-1 プログラム動作環境

計算機	パソコン用コンピュータ
OS	Windows 2000 以上
CPU	Pentium 4 以上
メモリ	128 MB 以上
HDD	500 MB 以上
これまでに、OS に関しては Windows 2000, Windows XP, CPU に関しては Pentium 4 について動作を確認した。	

5 使用マニュアル

5.1 入力データの指定方法

入力カード(データ)の一覧を表 5-1に、各カード番号の指定方法を次ページ以降に示す。
入力カードは指定方法に従ってテキストファイルで作成する。

表 5-1 入力カード一覧

カード番号	指定内容
1	解析年数と各セルのサンプリング配管数の指定
2	各種フラグの指定
3	形状パラメータの指定
4	流速の指定
5	pH の指定
6	酸素濃度の指定
7	クロム・モリブデン含有量の指定
8	材料密度の指定
9	温度の指定
10	配管の初期板厚の指定
11	配管の初期内半径の指定
12	材料の引張り強さの指定
13	周方向ひずみの指定
14	ヤング率の指定
15	降伏応力の指定
16	加工硬化係数の指定
17	破断絞りの指定
18	質量流速の指定
19	飽和水の密度の指定
20	蒸気クオリティの指定
21	ボイド率の指定
22	定常時の状態の指定
23	腐食減肉角度の層数の指定
24	腐食減肉角度の各層の指定
25	地震の総数の指定
26	各地震の波数の指定
27	各地震波のサイクル数、応力等の指定
28	過渡事象数の指定
29	各過渡事象の発生間隔の指定
30	各過渡事象の応力等の指定

・入力カードのフォーマット

各カード番号の指定内容は1行中に左から順に指定する。カラム数に指定がない行はフリーフォーマットで指定する。Cまたはcで始まる行はコメントとみなされ、空行も無視される。

● カード番号1 解析年数と各セルのサンプリング配管数の指定

項目	カラム数	単位	指定型
解析年数	1-10	年	整数
各セルのサンプリング配管数	11-20	—	整数

※このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号2 各種フラグの指定

項目	カラム数	単位	指定型
デバッグ出力フラグ 0: デバッグ出力する 1: デバッグ出力しない	—	—	整数
減肉率の乱数発生フラグ 0: 減肉率を計算するたび 1: 配管を採点するたび	—	—	整数
破壊クライテリア選択フラグ 1の位が1: 原研の式(オリジナル) 1の位が2: 宮崎らの式 1の位が3: Kanninen の式 1の位が4: 原研の式(変形版) 10の位が1: Wesley の式 100の位が1: Coffin の式 1000の位が1: 朝田実験式I 10000の位が1: 朝田実験式II	—	—	整数
単相、2相 切り替えフラグ 0: 単相 1: 2相	—	—	整数
減肉率の確率論的シフトの考慮 0: 考慮する 1: 考慮しない	—	—	整数
減肉率の確率論的シフト種類 0: 4領域 1: 1領域	—	—	整数
減肉率確率論的シフトの対数正規分布平均値 (自然対数を作成させた値を指定: 1領域のみ)	—	—	実数
減肉率確率論的シフトの対数正規分布標準偏差 (自然対数を作成させた値を指定: 1領域のみ)	—	—	実数
減肉率確率論的シフトの対数正規分布ばらつき閾値 (減肉率確率論的シフトの対数正規分布標準偏差の何倍かで指定: 1領域のみ)	—	—	実数
減肉率確率論的シフトの対数正規分布傾き (自然対数を作成させた値を指定: 1領域のみ)	—	—	実数
減肉量積算フラグ	—	—	整数

0: 積算しない 1: 各評価時間間隔毎の減肉量積算			
減肉量出力フラグ 0: 出力しない 1: 出力する	—		整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 3 形状パラメータの指定

項目	カラム数	単位	指定型
形状パラメータ平均値	1-10	—	実数
形状パラメータ標準偏差	11-20	—	実数
形状パラメータの乱数発生フラグ 0: 配管を採点するたび 1: 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 4 流速の指定

項目	カラム数	単位	指定型
流速平均値	—	m/s	実数
流速標準偏差	—	m/s	実数
流速下限値（絶対値）	—	m/s	実数
流速上限値（絶対値）	—	m/s	実数
流速の乱数発生フラグ 0: 配管を採点するたび 1: 減肉率を計算するたび	—	—	整数
流速データサンプリング種類フラグ 0: 内部で計算 1: データテーブルファイルを読み込む	—	—	整数
流速データテーブルファイル名 (流速データサンプリング種類フラグで1を指定したときのみ使用。0の場合はダミーファイルを指定)	—	—	文字列

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 5 pH の指定

項目	カラム数	単位	指定型
pH 平均値	—	—	実数
pH 標準偏差	—	—	実数
pH 下限値(絶対値)	—	—	実数
pH 上限値(絶対値)	—	—	実数
pH の乱数発生フラグ 0: 配管を採点するたび 1: 減肉率を計算するたび	—	—	実数
pH データサンプリング種類フラグ 0: 内部で計算 1: データテーブルファイルから読み込む	—	—	実数
pH データテーブルファイル名 (pH データサンプリング種類フラグで 1 を指定したときのみ使用。0 の場合はダミーファイルを指定)	—	—	文字列

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 6 酸素濃度の指定

項目	カラム数	単位	指定型
酸素濃度平均値	—	ppb	実数
酸素濃度標準偏差	—	ppb	実数
酸素濃度下限値(絶対値)	—	ppb	実数
酸素濃度上限値(絶対値)	—	ppb	実数
酸素濃度の乱数発生フラグ 0: 配管を採点するたび 1: 減肉率を計算するたび	—	—	整数
酸素データサンプリング種類フラグ 0: 内部で計算 1: データテーブル	—	—	整数
酸素データテーブルファイル名 (流速データサンプリング種類フラグで 1 を指定したときのみ使用。0 の場合はダミーファイルを指定)	—	—	文字列

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 7 クロム・モリブデン含有量の指定

項目	カラム数	単位	指定型
クロム・モリブデン平均値	—	wt%	実数
クロム・モリブデン標準偏差	—	wt%	実数
クロム・モリブデン下限値(絶対値)	—	wt%	実数
クロム・モリブデン上限値(絶対値)	—	wt%	実数
クロム・モリブデンの乱数発生フラグ 0: 配管を採点するたび 1: 減肉率を計算するたび	—	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 8 材料密度の指定

項目	カラム数	単位	指定型
材料密度平均値	1-10	$\mu \text{ g/cm}^3$	実数
材料密度標準偏差	11-20	$\mu \text{ g/cm}^3$	実数
材料密度の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 9 溫度の指定

項目	カラム数	単位	指定型
温度平均値	—	°C	実数
温度標準偏差	—	°C	実数
温度下限値(絶対値)	—	°C	実数
温度上限値(絶対値)	—	°C	実数
温度の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	—	—	整数
温度データサンプリング種類フラグ 0: 内部で計算 1: データテーブルファイルから読み込む	—	—	整数
温度データテーブルファイル名 (温度データサンプリング種類フラグで 1 を指定したときのみ使用。0 の場合はダミーファイルを指定)	—	—	文字列

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 10 配管の初期肉厚の指定

項目	カラム数	単位	指定型
配管の初期肉厚平均値	1-10	cm	実数
配管の初期肉厚標準偏差	11-20	cm	実数
配管の初期肉厚の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数
許容減肉量(この値以上減肉すると漏えいと判定される)	31-40	cm	実数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 11 配管の初期内半径の指定

項目	カラム数	単位	指定型
配管の初期肉厚平均値	1-10	cm	実数
配管の初期肉厚標準偏差	11-20	cm	実数
配管の初期肉厚の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 12 材料の引張り強さの指定

項目	カラム数	単位	指定型
材料の引張り強さ平均値	1-10	MPa	実数
材料の引張り強さ標準偏差	11-20	MPa	実数
材料の引張り強さの乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数
材料の流動応力平均値 (原研の式の破壊クライテリアの場合のみ使用)	31-40	MPa	実数
材料の流動応力標準偏差 (原研の式の破壊クライテリアの場合のみ使用)	41-50	MPa	実数
材料の流動応力の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび (原研の式の破壊クライテリアの場合のみ使用)	51-60	—	整数
組み合わせ荷重下の最大曲げモーメント (原研の式の破壊クライテリアの場合のみ使用)	61-70	kgf *m	実数

※ このカードは、破壊クライテリアに宮崎、Wesley, Kanninen, 原研(含む変形版)の式を選択した際、使用される

● カード番号 13 周方向ひずみの指定

項目	カラム数	単位	指定型
周方向ひずみ平均値	1-10	—	実数
周方向ひずみ標準偏差	11-20	—	実数
周方向ひずみの乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、破壊クライテリアに Wesley, 原研(変形版)の式を選択した際、使用される

● カード番号 14 ヤング率の指定

項目	カラム数	単位	指定型
ヤング率平均値	1-10	MPa	実数
ヤング率標準偏差	11-20	MPa	実数
ヤング率の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、破壊クライテリアに Coffin, 朝田 I、朝田 II の式を選択した際、使用される

● カード番号 15 降伏応力の指定

項目	カラム数	単位	指定型
降伏応力平均値	1-10	—	実数
降伏応力標準偏差	11-20	—	実数
降伏応力の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : FAC 率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、破壊クライテリアに Coffin, 朝田 I、朝田 II の式を選択した際、使用される

● カード番号 16 加工硬化係数の指定

項目	カラム数	単位	変数名
加工硬化係数平均値	1-10	MPa	実数
加工硬化係数標準偏差	11-20	MPa	実数
加工硬化係数の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : FAC 率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、破壊クライテリアに Coffin, 朝田 I、朝田 II を選択した際、使用される

● カード番号 17 破断絞りの指定

項目	カラム数	単位	指定型
破断絞り平均値	1-10	%	実数
破断絞り標準偏差	11-20	%	実数
破断絞りの乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、破壊クライテリアに Coffin, 朝田 I、朝田 II を選択した際、使用される

● カード番号 18 質量流速の指定

項目	カラム数	単位	指定型
質量流速平均値	1-10	kg/m ² s	実数
質量流速標準偏差	11-20	kg/m ² s	実数
質量流速の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、単相、2相 切り替えフラグに2相を選択した際、使用される

● カード番号 19 飽和水の密度の指定

項目	カラム数	単位	指定型
飽和水の密度平均値	1-10	kg/m ³	実数
飽和水の密度標準偏差	11-20	kg/m ³	実数
飽和水の密度の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、単相、2相 切り替えフラグに2相を選択した際、使用される

● カード番号 20 蒸気クオリティの指定

項目	カラム数	単位	指定型
蒸気クオリティの密度平均値	1-10	—	実数
蒸気クオリティの密度標準偏差	11-20	—	実数
蒸気クオリティの密度の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、単相、2相 切り替えフラグに2相を選択した際、使用される

● カード番号 21 ボイド率の指定

項目	カラム数	単位	指定型
ボイド率平均値	1-10	—	実数
ボイド率標準偏差	11-20	—	実数
ボイド率の乱数発生フラグ 0 : 配管を採点するたび 1 : 減肉率を計算するたび	21-30	—	整数

※ このカードは、単相、2相 切り替えフラグに2相を選択した際、使用される

● カード番号 22 定常時の状態の指定

項目	カラム数	単位	指定型
ダミーパラメータ	1-10	—	実数
ダミーパラメータ	11-20	—	実数
定常時内圧	21-30	MPa	実数
ダミーパラメータ	31-40	—	実数
ダミーパラメータ	41-50	—	実数
ダミーパラメータ	51-60	—	実数
1次膜応力	61-70	—	実数
1次曲げ応力	71-80	—	実数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 23 腐食減肉角度の層数の指定

項目	カラム数	単位	指定型
腐食減肉角度の層数	1-10	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 24 腐食減肉角度の各層の指定

項目	カラム数	単位	変数名
この層の開始角度（半角度）	1-10	度	実数
この層の終了角度（半角度）	11-20	度	実数
この層の確率密度	21-30	—	実数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

※ このカードは、「カード番号 23 腐食減肉角度の層数の指定」で指定した数だけ記述する

● カード番号 25 地震の総数の指定

項目	カラム数	単位	指定型
ダミーパラメータ (常に 3 を指定する)	1-10	—	整数
地震の総数	21-30	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 26 各地震の波数の指定

項目	カラム数	単位	指定型
各地震の波数	1-5	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

※ このカードは、「カード番号 25 地震の総数の指定」で指定した数だけ記述する

※ このカードを 1 つ記述するたびに、「カード番号 27 各地震波のサイクル数、応力等の指定」を必要数記述する

● カード番号 27 各地震波のサイクル数、応力等の指定

項目	カラム数	単位	指定型
この地震波におけるこの応力のサイクル数	1-10	—	実数
1 次膜応力最大値	11-20	MPa	実数
1 次膜応力最小値	21-30	MPa	実数
1 次曲げ応力最大値	31-40	MPa	実数
1 次曲げ応力最小値	41-50	MPa	実数
内圧	51-60	MPa	実数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

※ このカードは、「カード番号 26 各地震の波数の指定」で指定した数だけ記述する

● カード番号 28 過渡事象数の指定

項目	カラム数	単位	指定型
過渡事象数	1-10	—	整数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

● カード番号 29 各過渡事象の発生間隔の指定

項目	カラム数	単位	指定型
事象サイクル数	1-5	—	整数
事象発生間隔 正の値：均一間隔 負の値：ポアソン分布	5-20	—	実数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

※ このカードは、「カード番号 28 過渡事象数の指定」で指定した数だけ入力する

※ このカードを 1 つ記述するたびに、「カード番号 30 各過渡事象の応力等の指定」を必要数記述する

● カード番号 30 各過渡事象の応力等の指定

項目	カラム数	単位	指定型
1 次膜応力最大値	1-10	MPa	実数
1 次膜応力最小値	11-20	MPa	実数
過渡事象 ID 番号	21-25	—	整数
1 次曲げ応力最大値	26-35	MPa	実数
1 次曲げ応力最小値	36-45	MPa	実数
2 次膜応力最大値	46-55	MPa	実数
2 次膜応力最小値	56-65	MPa	実数
2 次曲げ応力最大値	66-75	MPa	実数
2 次曲げ応力最小値	76-85	MPa	実数
内圧	86-95	MPa	実数

※ このカードは、解析の際、常に使用される

※ 1 つの過渡事象に対して、本カードを複数入力する場合、過渡事象 ID 番号は全て同一にする必要がある。

※ 1 つの過渡事象の入力が終了し、次の過渡事象の入力をを行う場合、「カード番号 28 各過渡事象の発生間隔の指定」から入力を行う。この際、前の過渡事象 ID 番号とは異なる過渡事象 ID 番号を指定する必要がある。

※ 全ての過渡事象の入力が終了した場合、次の行の先頭に「##」と入力する必要がある

● 入力データテーブルフォーマット（各項目はスペースで区切る）

PH, 流速、酸素濃度、水温は予め用意した入力データテーブルファイルからデータを読み込んで解析を実施することができる。入力データテーブルのフォーマットを以下に示す。

時刻単位 (y:年、 m:月、 d:日のうちいずれか)			
時刻(昇順)	平均値	エラーバー上限	エラーバー下限
:	:	:	:
例			
y 1 9.076763485 9.20746888 8.914937759 2 9.132780083 9.20746888 8.995850622 3 9.12033195 9.201244813 8.995850622 4 9.082987552 9.201244813 8.995850622 5 9.076763485 9.114107884 9.002074689 6 9.151452282 9.219917012 9.107883817 7 9.151452282 9.20746888 9.002074689 8 9.157676349 9.201244813 9.107883817 9 9.039419087 9.114107884 8.989626556			
※値の不確かさは正規分布を仮定し標準偏差 $\sigma = 0.5\{(\text{エラーバー上限}) - (\text{エラーバー下限})\}$ としている。			
※決定論的な解析を行う場合には、(エラーバー上限) = (エラーバー下限)と設定する。			

5.2 プログラム実行方法

DOS コマンドラインで入力カードファイル(InputFileName)を指定し、以下のように実行する。

```
pascal_ec.exe InputFileName
```

5.3 解析結果の出力

解析を実行すると表 5-2に示すファイルが作成される。

表 5-2 解析結果出力ファイル

内容	出力ファイル名 (InputFileName:実行時に指定した入力カードファイル)	備考
解析条件	InputFileName.chk	
解析結果 (破損確率)	InputFileName.rsl	
減肉量	InputFileName1.csv, InputFileName2.csv,...	減肉量出力フラグで“出力する”を指定した場合のみ出力

5.3.1 解析条件出力ファイル

解析条件(InputFileName.chk)の出力例を表 5-3に示す。

表 5-3 解析条件出力ファイル例

```
***** INPUT PARAMETER *****

----- time & number -----
years : 40
pipe number : 100000

----- flag set -----
debug write : OFF
random number of EC : per pipe
failure criterion : Coffin's law
phase of fluid : single-phase
EC speed shift : consider

----- erosion-corrosion parameter -----
parameter name : mean standard random number
                  value deviation flag
geometrical factor kc : 7.500000E-01 0.000000E+00 per pipe
flow velocity w : 5.181600E+00 3.450000E-02 per pipe
pH value pH : 8.900000E+00 8.900000E-02 per pipe
oxygen content g : 1.200000E+00 8.000000E-02 per pipe
content of Cr-Mo h : 8.000000E-02 5.300000E-03 per pipe
density of steel rho_st : 8.500000E+06 0.000000E+00 per pipe
temperature t : 1.898500E+02 7.720000E-01 per pipe
initial thickness w_org : 1.270000E+00 0.000000E+00 per pipe
pipe inner radius r : 2.290000E+01 0.000000E+00 per pipe
failure stress sig_uts : 5.398785E+02 5.398785E+01 per pipe
hoop strain epsln_f : 3.700000E+00 3.700000E-01 per pipe
young's modulus ygml : 2.000000E+05 0.000000E+00 per pipe
yield stress sig_y : 2.100000E+02 0.000000E+00 per pipe
work hard value val_h : 2.000000E+03 0.000000E+00 per pipe
reduction of area phi : 6.750227E+01 0.000000E+00 per pipe
mass flux dm : 1.000000E+00 0.000000E+00 per pipe
density of water rho_w : 1.000000E+00 0.000000E+00 per pipe
steam quality xst : 1.000000E+00 0.000000E+00 per pipe
void fraction alpha : 1.000000E+00 0.000000E+00 per pipe

----- normal operating condition -----
pressure : 1.000000E+01
primary membrane stress : 1.000000E+01
primary bending stress : 5.000000E+01

----- stratified monte-carlo parameter -----
number of layers : 1

layer numbe start position end position weight
                  (deg)          (deg)
1  0.000000E+00  1.800000E+02  1.000000E+00

----- earthquake parameter -----
```

equation option	:	3			
total equation number	:	1			
equation number	:	1			
total wave number	:	1			
cycle number	max membrane stress	min. membrane stress	max bending stress	min bending stress	pressure
2000	1.80000E+02	0.00000E+00	1.80000E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
----- transient parameter -----					
total transient number	:	8			
transient number	:	1			
cycle number	:	5.0000			
time interval	:	1.00000E+00			
stress	primary membrane stress (max)	primary bending stress (min)	secondly membrane stress (max)	secondly bending (min)	pressure (max)
	1.534500E+02	0.00000E+00	1.550000E+00	-1.550000E+00	0.000000E+00
	0.000000E+00	1.000000E+01			0.000000E+00
(以下省略)					

5.3.2 解析結果出力ファイル

解析結果の出力ファイル例を表 5-4に示す。

表 5-4 解析結果出力ファイル例

Steady and Transients,				
Year, Leak, Leak_std, Break, Break_std				
0. 000000E+00,	0. 000000E+00,	0. 000000E+00,	0. 000000E+00,	0. 000000E+00
1. 000000E+00,	0. 000000E+00,	0. 000000E+00,	0. 000000E+00,	0. 000000E+00
(途中省略)				
2. 000000E+01,	7. 452400E-01,	1. 222617E-03,	1. 790300E-01,	1. 212346E-03
2. 100000E+01,	7. 658800E-01,	1. 264128E-03,	2. 013900E-01,	1. 268196E-03

凡例

Leak	漏えい確率
Leak_std	漏えい確率標準偏差
Break	破断確率
Break_std	破断確率標準偏差

5.3.3 減肉量出力ファイル

減肉量出力ファイルのフォーマットを表 5-5に示す。

表 5-5 減肉量出力ファイル・ファーマット

	評価時刻(0 年)	評価時刻(1 年)	:
配管番号(1 番)	減肉量	減肉量	:
配管番号(2 番)	減肉量	減肉量	:
:	:	:	:

※破断・漏えい判定されなかった評価時刻の減肉量は-1 となっている。

※評価時刻の単位は[year],減肉量の単位は[cm]である

※サンプリング数（配管数）が 5 万毎に、別ファイル名で保存される。ファイル名は順に、

入力カードファイル名 1.csv、入力カードファイル名 2.csv..の形式である。配管番号は全ファイルで通し番号となっている。

5.4 サンプル問題

米国サリー発電所 2 号機における給水管破断事故のデータを参考にパラメータ値を設定し(表 5-6)、減肉率モデル及び破壊クライテリアが破損確率に及ぼす影響について試解析を実施した。

表 5-6 サンプル問題パラメータ設定値

パラメータ	条件
供用時間	40 年
試行配管数(サンプリング数)	10000000 個
乱数を発生する箇所	配管毎
各パラメータの更新時間	配管毎
幾何学ファクター	平均値 0.75 標準偏差 0.0
流速 $w(\text{m/sec})$	平均値 5.1816 標準偏差 0.0345
pH	平均値 8.9 標準偏差 0.089
分解酸素濃度 g(ppb)	平均値 1.2 標準偏差 0.08
材料成分 h(Cr+Mo,wt%)	平均値 0.08 標準偏差 0.005
材料密度 ρ_{st} ($\mu \text{g/cm}^3$)	平均値 7.86×10^6 標準偏差 0.0
水温 T(°C)	平均値 190 標準偏差 2.0
配管初期肉厚 $W_{\text{pipe}}(t=0)(\text{cm})$	平均値 1.27 標準偏差 0.0
許容減肉量(cm)	0.85
配管内半径 r (cm)	平均値 22.9 標準偏差 0.25
材料の引張り強さ (MPa)	平均値 500 標準偏差 52
流動応力(MPa)	平均値 425 標準偏差 42.5
最大曲げ応力(kgf*m)	2.63122×10^3
腐食減肉角度	0° ~ 180° で一様分布
内圧(MPa)	10.0
一次膜応力(MPa)	10.0
一次曲げ応力(MPa)	50.0

5.4.1 減肉率モデルが破損確率に及ぼす影響

破壊クライテリアとして宮崎の式を用い、減肉率の確率変数 E を表 2-3に示した“4 領域”、表 2-4に示した“単相流及び 2 相流”及び“単相流”の各ケースで試解析を実施した。解析結果を図 5-1に示す。

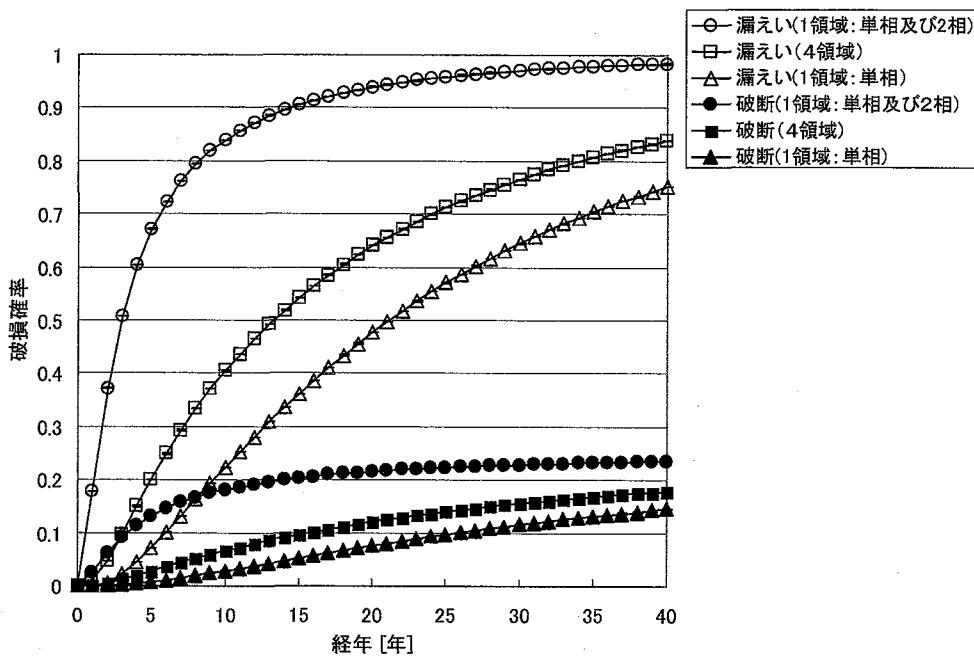


図 5-1 減肉率モデルが破損確率に及ぼす影響

5.4.2 破壊クライテリアが破断確率に及ぼす影響

減肉率モデルを表 2-4に示した単相流、内圧を 0 として実断面応力基準を含む破壊クライテリアである Kanninen の式、宮崎の式、原研の式を用いて試解析を実施した。解析結果を図 5-2に示す。Kanninen の式と宮崎の式は内圧が 0 の場合、同じ評価式となるため同じ破断確率となる。

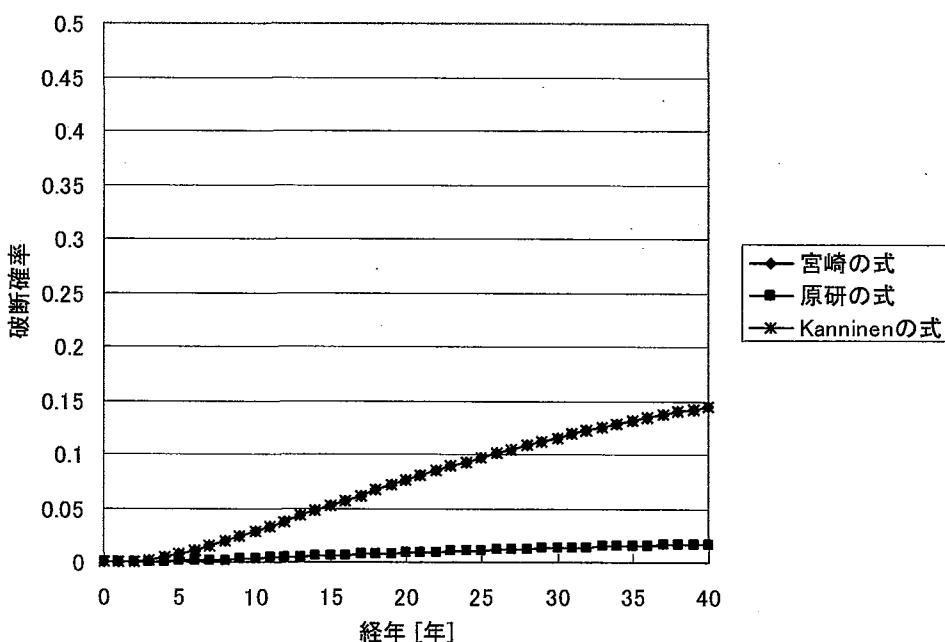


図 5-2 破壊クライテリアが破壊確率に及ぼす影響

6 まとめ

本報告書は、炭素鋼配管の減肉に対する破損確率解析コード PASCAL-EC の使用法を中心に解析理論及び手法を取りまとめたものである。PASCAL-EC には最近の破壊判定法が盛り込まれている。本コードにより、減肉を受ける炭素鋼配管の破損確率を最近の知見により評価可能である。

謝辞

本コード開発を進めるにあたり、鈴木雅秀安全研究センター研究主席、みずほ情報総研株式会社の李銀生氏から多大な御協力を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) G. Yagawa, Y. Kanto, S. Yoshimura, et al. "Probabilistic fracture mechanics analysis of nuclear structural components: a review of recent Japanese activities", Nuclear Engineering and Design, 207, 269-286 (2001).
- 2) 柴田勝之, 鬼沢邦雄, 李銀生 他 "確率論的破壊力学コード PASCAL の開発と使用手引き" JAERI-Data/Code 2001-11.
- 3) 伊藤裕人、鬼沢邦雄、柴田勝之、"確率論的破壊力学解析コード PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の使用手引き" JAERI-Data/Code 2005-7.
- 4) W. Kastner and E. Riedle, "Empirische Modell zur Berechnung von Materialabträgen durch Erosionskorrasion", VGB Kraftwerkstechnik, 66-12 1023-1029, (1986).
- 5) W. KASTNER, M. ERVE, N. HENZEL et al., "CALCULATION CODE FOR EROSION CORROSION INCLUDED WALL THINNING IN PIPING SYSTEMS", Nuclear Engineering Design 119 (1990).
- 6) C. L. Smith et al., "Incorporating Aging Effects into Probabilistic Risk Assessment – A Feasibility Study Utilizing Reliability Physics Models", NUREG/CR-5632, (2000).
- 7) D. A. Wesley, "Screening Methods for Developing Internal Pressure Capacity for Components in Systems Interfacing with Nuclear Power Plant Reactor Coolant Systems", NUREG/CR-5862, (1992).
- 8) M. F. Kanninen, et al. "Mechanical Fracture Predictions for Sensitized Stainless-Steel Piping with Circumferential Cracks", EPRI NR-192 (1976).
- 9) Miyazaki K., Kanno S., et al. "Fracture and general yield for carbon steel pipes with local wall thinning", NED, Vol.211, p61-68 (2002).
- 10) Miyazaki K., Kanno S., et al. "Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load", NED, Vol.191, p195-204 (1999).
- 11) 磯崎敏邦、柴田勝之他、"配管信頼性実証試験技術報告書"、JAERI-M 93-076 (1993).
- 12) 中村いづみ、大谷章仁、白鳥正樹、"機器・配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研究 報告書"、防災科学技術研究所研究資料、第 220 号、2001 年 10 月。
- 13) Coffin L. F, et al. "The Deformation and Fracture of Ductile Metals under superposed Cyclic and Monotonic Strain", ASTEM STP 467 (1970).
- 14) Asada Y, et al. "Failure Criterion on Low-Cycle Fatigue with Excessive Progressive Deformation", Proceedings of 3rd German-Japanese Joint Seminar, II 2.2 (1985).