原子力発電

電力中央研究所報告

亀裂深さ分布の裾野の形状がPFM評価に及ぼす影響

研究報告：Q18006

2019年4月

電力中央研究所

CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

亀裂深さ分布の裾野の形状が **PFM** 評価に及ぼす影響

永井　政貴[*1]　　三浦　直樹[*2]　　山本　真人[*3]
野本　明義[*3]

キーワード：確率論的破壊力学
構造健全性評価
裾野の厚い分布
安定分布
応力腐食割れ

Key Words：Probabilistic Fracture Mechanics
Structural Integrity Assessment
Fat Tailed Distribution
Stable Distribution
Stress Corrosion Cracking

Effect of tail of crack depth distribution on PFM evaluation

Masaki Nagai, Naoki, Miura, Masato Yamamoto and Akiyoshi Nomoto

Abstract

Probabilistic fracture mechanics (PFM) is a promising structural integrity assessment methodology capable of quantitatively evaluating fracture frequency by comparing applied force with material's strength. Inputs for PFM calculation are given as random variables with a median value and certain distribution. Normally the shape of distribution is determined based on the available data source, whose number of data points are not necessarily sufficient to ensure the distribution in the tail region. It is known that different kinds of distributions, normal, log-normal and exponential for example, will give different shaped tails, and possibly affect the failure probability in a low probability region, which is important in PFM evaluation. For instance, stable distribution with a shape parameter of less than 2 is a "fat tail," in which the probability of failure in the tail region exceeds that in normal distribution. The effect of the tail on the through-wall cracking probability was investigated between two types of distributions; normal or stable. Although both distributions showed a fairly good match with the actual crack depth data, the resulting probabilities differed, and we obtained a higher probability with the fat tail (stable distribution). This result simply indicates that the rare sampling of deep flaws still impacts on the probability of failure in a marked manner.

[*1] 材料科学研究所　構造材料領域　主任研究員
[*2] 材料科学研究所　研究参事
[*3] 材料科学研究所　構造材料領域　上席研究員

背　　景

確率論的破壊力学（PFM）は，破壊の駆動力および破壊抵抗が統計的なばらつきや不確実性を有していると考え，これらを確率分布によりモデル化し確率変数として扱うことで，破壊の発生する頻度を定量的に評価しようとする学問体系である．PFM は従来の決定論的評価と比較して，過度な保守性を排除した合理的な評価が可能であることから，国内外において注目されている．確率分布によりモデル化されるばらつきは物理的な上下限を有しており，分布の裾野[注1] のどの位置に上下限を設定するのかが議論されている[1]．一方で，確率分布によって裾野の厚さ[注2] は異なっており，裾野の厚さが PFM 評価結果に及ぼす影響についてはこれまで十分に議論されてこなかった.

目　　的

PFM 評価において確率変数として扱われる初期亀裂深さのばらつきを正規分布や裾野の厚い分布として知られる安定分布[注3] でモデル化し，その評価結果への影響を調べる.

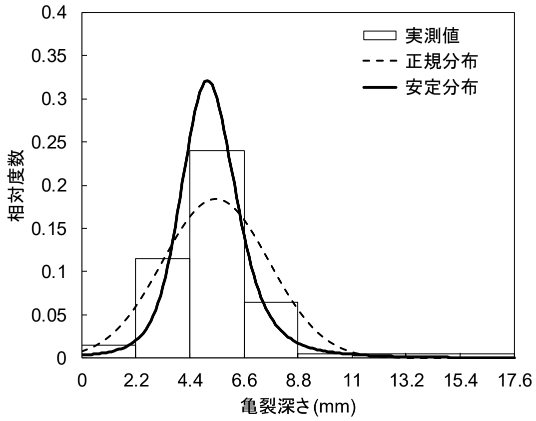
主な成果

1. 亀裂深さの実測値のばらつきのモデル化

国内の沸騰水型軽水炉プラントの再循環系配管溶接部において検出された応力腐食割れ（SCC）亀裂の深さ分布[注4] を，正規分布または安定分布としてモデル化し（図 1, 2），これを初期亀裂深さ分布と仮定して PFM による SCC 亀裂進展評価を実施した．その結果，運転時間 0 年から 30 年頃までは，安定分布を用いた結果の方が正規分布を用いた結果と比較して高い亀裂貫通確率で推移していた（図 3）．これは安定分布の裾野が正規分布のそれと比較して厚く，安定分布の方が深い亀裂が多数サンプリングされたためと考えられる.

2. 亀裂発生を考慮した PFM 評価から得られる亀裂深さのばらつきのモデル化

亀裂発生頻度を運転開始から線形に増加し，10 年目以降は線形に減少する三角分布でモデル化し，PFM 評価を実施して供用期間中に発生・成長した亀裂の深さ分布を調べた．同分布を正規分布または安定分布としてモデル化し（図 4），これを初期亀裂深さ分布と仮定して PFM 評価を実施した．その結果，上記 1 の結果と同じく安定分布を用いた結果の方が高い亀裂貫通確率で推移していた（図 5）．これらから，亀裂深さのばらつきを表す確率分布の裾野の厚さは亀裂貫通確率に大きく影響していると言え，裾野をどのように表すのかが PFM 評価を行う上で重要となる.



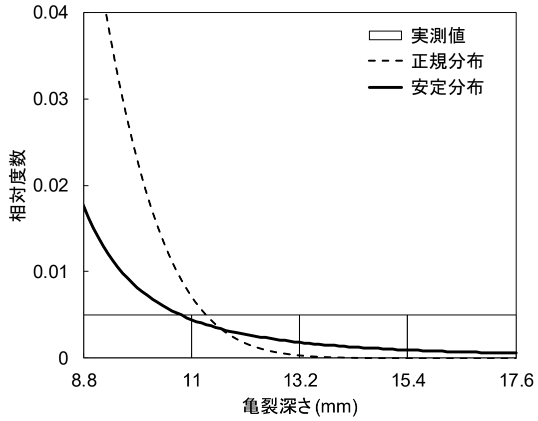
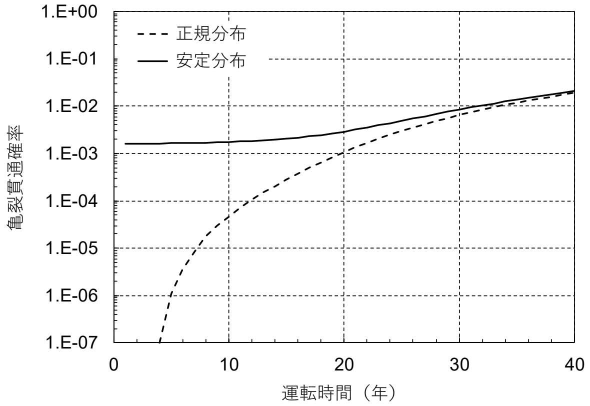


図 1 亀裂深さの実測値のヒストグラムと確率密度関数

正規分布，安定分布ともに実測値の平均を捉えている．

図 2 図 1 の裾野の拡大図

正規分布の確率密度関数は急速に 0 に近づくのに対し，安定分布のそれは緩やかに減少する．



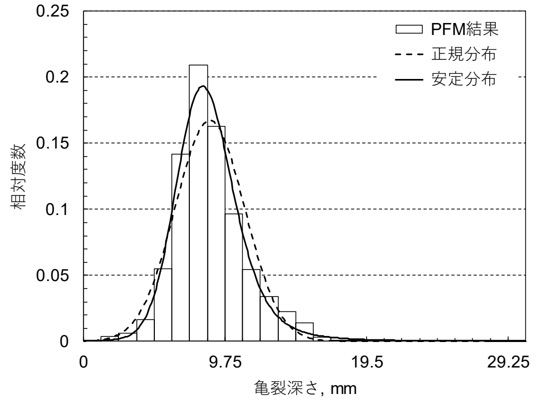


図 3 亀裂深さの実測値のばらつきをモデル化したときの亀裂貫通確率の推移

運転時間 0 年から 30 年頃までは安定分布を用いた結果の方が高い亀裂貫通確率で推移する．

図 4 亀裂発生を考慮した PFM 評価から得られる亀裂深さのヒストグラムと確率密度関数

正規分布，安定分布ともに亀裂深さ分布の平均を捉えている．

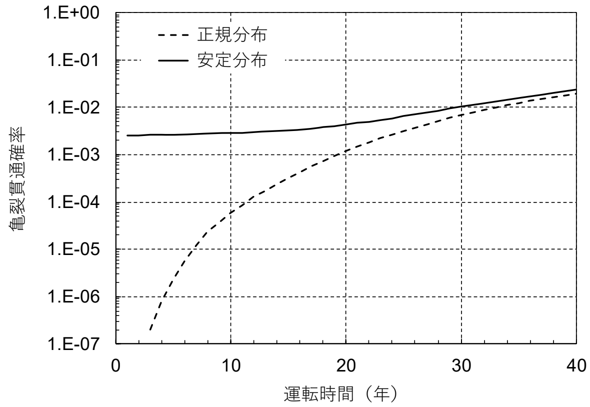


図 5 亀裂発生を考慮した PFM 評価から得られる亀裂深さのばらつきをモデル化したときの亀裂貫通確率の推移

運転時間 0 年から 30 年頃までは安定分布を用いた結果の方が高い亀裂貫通確率で推移する．

注1）本報では，確率密度関数の低確率な領域を分布の裾野と表現する．
注2）本報では，正規分布との比較において確率密度関数の減少の仕方が緩慢な分布を「裾野が厚い」分布と表現する．
注3）正規分布やコーシー分布を含むより広い確率分布であり，裾野の厚い分布のモデル化に適している．
注4）町田秀夫，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 77, pp. 1798-1813, 2011.

関連報告書：
[1]Q15003「復元抽出による確率論的破壊力学解析コードの開発」(2016.02)

目　　次

1.　緒　言 1

2.　亀裂深さの実測値のばらつきのモデル化の検討 2
2.1　安定分布 2
2.2　安定分布を用いた亀裂深さ分布のモデル化 3
2.3　安定分布を用いた PFM 解析 5

3.　亀裂発生を考慮した PFM 解析による供用期間中の亀裂深さ分布 7
3.1　亀裂発生を考慮した PFM 解析 7
3.2　解析により得られた供用期間中の亀裂深さ分布を用いた PFM 解析 8

4.　結　言 9

参考文献 11

1. 緒　言

確率論的破壊力学（Probabilistic Fracture Mechanics: PFM）は，破壊の駆動力および破壊抵抗，すなわち破壊に関連する因子が統計的なばらつきや不確実性を有していると考え，これらを確率変数として扱うことで破壊の発生する頻度を定量的に評価しようとする学問体系である．PFM に基づいた評価を行うことにより，上述の定量的な評価の実現に加え，従来の決定論的評価と比較して，説明性の向上や過度な保守性を排除した合理的な評価が可能となる．このような利点を活かす PFM 評価コードが国内外において多数開発されている[1-7].

破壊に関連する因子の統計的なばらつきや不確実性は，通常は確率分布によりモデル化される．PFM 評価においてよく用いられる確率分布としては，正規分布，対数正規分布，指数分布，ワイブル分布等がある．破壊の駆動力や破壊抵抗の統計的なばらつきは，物理的な上下限を有しており，確率分布でモデル化する際には，確率密度関数の低確率領域のような分布の裾野のどの位置に上下限を設定するのかが議論されている[7]．確率分布の裾野を測る指標としては，確率変数がある値より大きい値をとる確率を表す生存関数が用いられることがある [8]．図 1-1 は，期待値 1，分散 1 の正規分布，指数分布，および裾野の厚い分布として知られるパレート分布の生存関数の一部を示す．同図より，確率変数が大きくなれば正規分布の生存関数は急速に 0 に近づくが，指数関数のそれは正規分布と比較して減少の仕方が緩慢である．また，パレート分布については，確率変数が大きくなったときの減少の仕方が他の二つの分布と比較して一番緩やかである．すなわち，裾野の形状は確率分布によって異なり，正規分布では低確率と見なせる事象も，指数分布やパレート分布では，正規分布ほど低確率な事象と見なせない場合もあり得る．PFM 評価においては，上述した打ち切りの議論と比較すると，裾野の形状の議論はこれまであまり行われていなかった．他方，金融分野では確率分布の裾野の形状を正確にモデル化しようとする取り組みが行われており，例えば，磯貝[9]は日経平均株価の日次収益率を正規分布でモデル化すると，裾野の厚さ（文献[9]では正規分布との比較において確率密度関数の減少の仕方が緩慢な分布を「裾が厚い」と表現している．本報においても同様の意味で用いることとする.）を

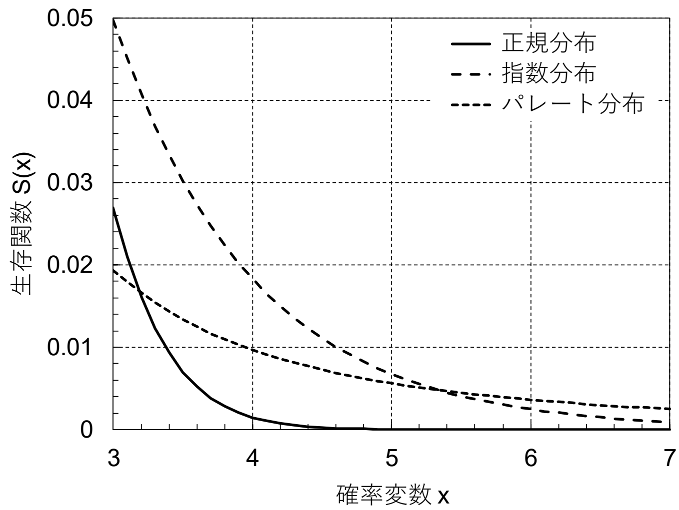


図 1-1　正規分布，指数分布およびパレート分布の裾野の形状［8］
Figure 1-1 Tails of Normal, Exponential and Pareto distributions [8]

適切に評価できないとして，より裾野の厚い分布を表せる安定分布を用いてモデル化している．

本報では，PFM 評価において確率分布の裾野に着目した研究として，実測された亀裂深さ分布や，亀裂発生を考慮した PFM 解析の結果得られる亀裂深さ分布を，裾野の厚い分布として知られる安定分布でモデル化し，確率分布の裾野の形状が PFM 評価結果に及ぼす影響を調べた．

2. 亀裂深さの実測値のばらつきのモデル化の検討

本章では，亀裂深さの実測値のばらつきを安定分布としてモデル化することを試みる．

2.1 安定分布

同じ確率分布に従う n 個の独立な確率変数 $X_1, X_2,..., X_n$ に対し，次式を満足する定数 $a_n > 0$ と b_n が存在するとき確率変数 X は安定分布に従う[10]．

$$\sum_{i=1}^{n} X_i = a_n X + b_n \tag{2-1}$$

これは，安定分布に従う独立同一分布な確率変数の和と平均は，スケールと位置は異なるが同じ安定分布に従うことを意味する[9]．

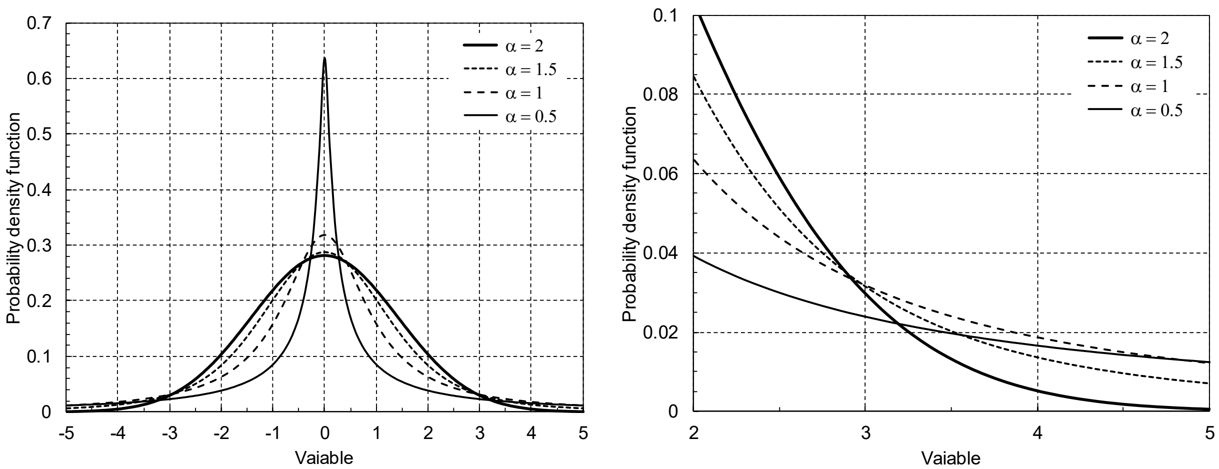
安定分布の確率密度関数 $f(x)$は陽な形で表せないが，特性関数$\varphi(t)$を次式に示す逆フーリエ変換することで得られる．

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t)\exp(-ixt)dt \tag{2-2}$$

安定分布の特性関数は次式で与えられる[10]．

$$\varphi(t) = \begin{cases} \exp\left[i\delta t - \gamma^{\alpha}|t|^{\alpha}\left\{1 - i\beta\frac{t}{|t|}\tan\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)\right\}\right] & (\alpha \neq 1) \\ \exp\left[i\delta t - \gamma|t|\left\{1 - i\beta\frac{t}{|t|}\frac{2}{\pi}\ln|t|\right\}\right] & (\alpha = 1) \end{cases} \tag{2-3}$$

ただし，$0 < \alpha \leq 2$, $|\beta| \leq 1$, $\gamma > 0$ である．α は形状母数で，分布の裾野の厚みの尺度であり，小さいほど裾野が厚い．β は分布の対称性を表す歪度母数，γは x の縮尺を変更する尺度母数である．δは分布全体を平行移動させる位置母数で，$\alpha > 1$ ならば



(a) Overview　　(b) Tail of probability density function

図 2-1　安定分布の確率密度関数
Figure 2-1 Probability density function of stable distribution

平均となる[10]．図 2-1 (a) および (b)は，$\beta = 0, \gamma = 1, \delta = 0$ でαを変化させたときの安定分布の確率密度関数を示す．安定分布の裾野を拡大して示す図 2-1 (b)より，α が小さくなるにつれて裾野が厚くなっていることがわかる．

以下では，安定分布の特別な場合を示す．$\alpha = 2, \beta = 0\ \gamma = \sigma/\sqrt{2}, \delta = \mu$の安定分布は次式で示す正規分布となる．

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{2-4}$$

上式で，μは平均，σは標準偏差である．また，$\alpha = 1, \beta = 0\ \gamma = \theta, \delta = \mu$の安定分布は次式で示すコーシー分布となる．

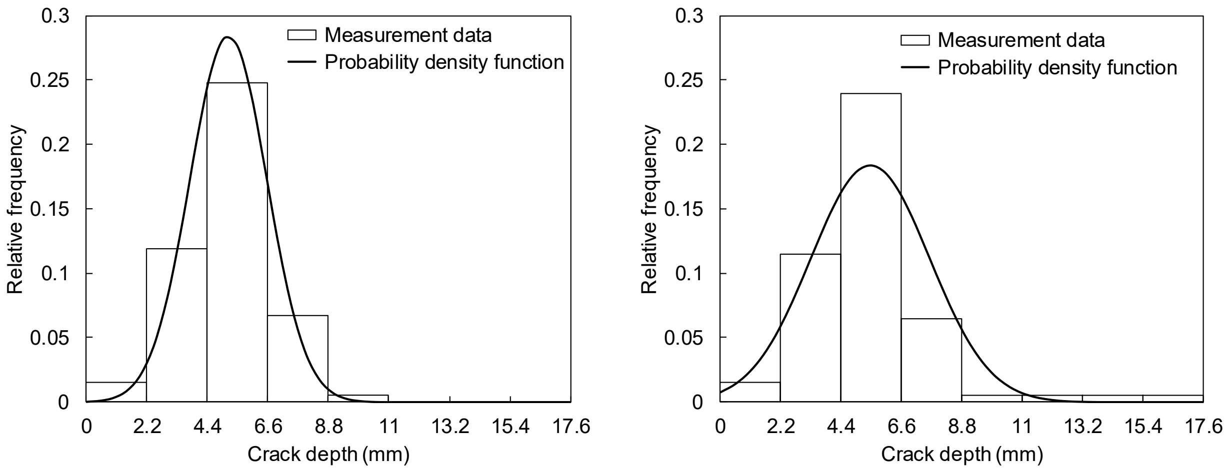
$$f(x) = \frac{1}{\pi}\left\{\frac{\theta}{\theta^2 + (x-\mu)^2}\right\} \tag{2-5}$$

さらに，$\alpha = 1/2, \beta = 1\ \gamma = \theta, \delta = \mu$の安定分布は次式で示すレヴィ分布となる．

$$f(x) = \sqrt{\frac{\theta}{2\pi}}(x-\mu)^{-3/2} \exp\left\{-\frac{\theta}{2(x-\mu)}\right\} \tag{2-6}$$

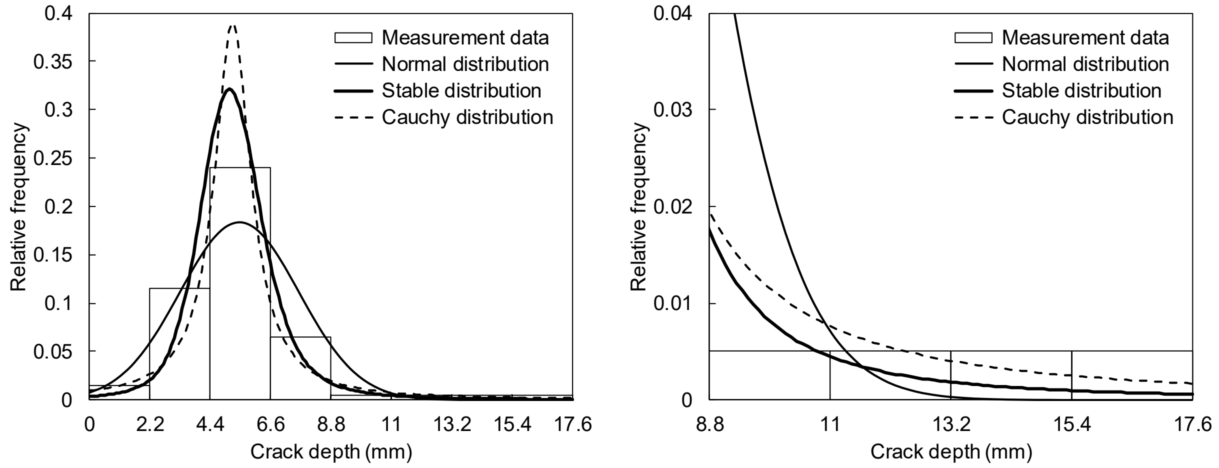
2.2 安定分布を用いた亀裂深さ分布のモデル化

国内の沸騰水型軽水炉（Boiling Water Reactor: BWR）の再循環系（Primary Loop Recirculation system: PLR）配管溶接部において，供用期間中検査にて検出された応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking: SCC）亀裂は，配管の取り替えを行うために切り出され，亀裂寸法が測定されている[11]. 町田は，これら 91 点の実測値を統計的に整理し，正規分布としてモデル化した上で，PFM 解析における初期亀裂深さ分布として用いている[3].
亀裂深さの実測値のヒストグラムと正規分布によりモデル化した確率密度関数を図 2-2 (a) および (b) に示す．ここで町田は，深さが 10 mm 以上の亀裂は，近接する亀裂が合体したことで，より深い亀裂として計測されており，そのため亀裂深さ分布は 10 mm を前後に異なる傾向を示すと考察している[3]．深さが 10 mm より小さい亀裂のデータから正規分布としてパラメータを推定すると，図 2-2 (a) に確率密度関数を示すμ = 5.16 mm およ



(a) Cracks with depth less than 10 mm　　(b) All cracks including those deeper than 10 mm

図 2-2　亀裂深さのヒストグラムと確率密度関数
Figure 2-2 Histogram and probability density function of crack depth



(a) Overall view　　(b) Tail of probability density functions

図 2-3　亀裂深さのヒストグラムと正規分布，安定分布およびコーシー分布の確率密度関数
Figure 2-3 Histogram and probability density functions of normal, stable and Cauchy distributions

表 2-1　各確率分布の検定結果
Table 2-1 Test results of various probabilistic distributions

帰無仮説		検　定		
		Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling	Shapiro-Wilk
データは正規分布に従う	p値	1.27×10^{-2}	8.41×10^{-3}	7.04×10^{-10}
	結 果※	棄却	棄却	棄却
データは安定分布に従う	p値	0.972	0.990	―
	結 果※	棄却されず	棄却されず	―
データはコーシー分布に従う	p値	0.774	0.500	―
	結 果※	棄却されず	棄却されず	―

※有意水準 5%で帰無仮説が棄却されるか否か

びσ= 1.43 mm となるが，10 mm より大きい亀裂を含む全データからパラメータを推定すると，図 2-2 (b) に確率密度関数を示すμ = 5.47 mm およびσ= 2.17 mm となる．文献[3]では保守的な評価となると考え，全データから推定されたμおよびσを用いて PFM 解析を行っている．

ここでは，亀裂深さの全データの分布を安定分布としてモデル化する．パラメータ推定した結果，α = 1.53, β = 0.261 γ = 0.891, δ = 5.36 となった．前節で示した通り，正規分布はα = 2 のとき安定分布の特別な場合であり，上記で推定された安定分布がα = 1.53 であるため，比較のためα = 1 のときの安定分布であるコーシー分布としてもデータをモデル化した．推定されたパラメータは，θ = 0.815, μ = 5.23 であった．図 2-3 (a) および (b) に実測値のヒストグラムと各分布の確率密度関数を示す．形状母数α が小さいほど裾野が厚いので，正規分布，安定分布，コーシー分布の順に裾野が厚くなると予想される．図 2-3 (b) は同図 (a)の裾野の部分を拡大したもので，上述した予想通りの順に裾野が厚くなっている．図 2-3 だけからは，どの確率分布が実測値をよくモデル化しているのかを一概には言えないので，実測値が正規分布，安定分布およびコーシー分布に従うと仮定したときの各種検定結果を表 2-1 に示す．同表より，ここで示す亀裂深さは正規分布に従うとは言えず，一方で，安定分布やコーシー分布に従わないとは言えない，という結果となった．これら結果から，

以下では，従来から用いられてきた正規分布と，実際の亀裂深さ分布をより正確に記述できると考えられる安定分布の比較検討行う．

2.3　安定分布を用いたPFM解析

前節で示した亀裂深さ分布を初期亀裂深さ分布と仮定して，以下に示す条件で PFM 解析を実施した．ここで言う初期亀裂深さ分布とは，プラントの供用開始時点ではなく，ある時点での亀裂深さ分布を示しており，後述する運転時間はその時点からの経過時間を示している．解析対象は亀裂深さの実測値の大部分が取得された SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼からなる 600A 配管（ここでは外径 609.6 mm，管厚 39 mm）を想定し，亀裂形状は配管内表面の周方向半だ円亀裂とした．確率変数は初期亀裂深さ，初期亀裂長さ，SCC 亀裂進展速度，溶接融合境界と亀裂発生点との距離，および流動応力とした．初期亀裂深さは前節で示した正規分布と安定分布を仮定した．ま

表 2-2　解析対象
Table 2-2 Analysis target

Target component	Weld of PLR piping
Crack geometry	Circumferentially semi-elliptical crack on inner surface
Temperature	300˚C
Piping geometry	600A（Outer diameter = 609.6 mm, thickness = 39 mm）

表 2-3　解析で用いた確率変数
Table 2-3 Random variables used in analysis

Variables	Probability density function
Initial crack depth, a	(a) Normal distribution μ_a = 5.47 mm, σ_a = 2.17 mm (b) Stable distribution α = 1.53, β = 0.261, γ = 0.891, δ = 5.36
Initial half of crack length, c	Log-normal distribution μ_c = 11.82, σ_c = 0.977
Flow stress, σ_{fs}	Normal distribution μ_{fs} = 436 MPa, σ_{fs} = 46.2 MPa
SCC crack growth rate	C: Log-normal distribution <Heat Affected Zone> μ_{C_HAZ} = 9.018 × 10^{-11}, σ_{C_HAZ} = 0.303, upper limit = 9.2 × 10^{-7} <Weld metal> μ_{C_Weld} = 1.017 × 10^{-11}, σ_{C_Weld} = 1.12, upper limit = 2.1 × 10^{-7} m: Constant value = 2.161
Distance from weld metal to a crack, L	Normal distribution μ_L = 1.15 mm, σ_L = 1.39 mm

表 2-4　荷重条件
Table 2-4 Load conditions

Applied stress used in crack growth analysis	- Internal pressure, p = 9.0 MPa - Membrane stress, p_m = 60.9 MPa
Applied stress used in fracture analysis	- Membrane stress, p_m = 27.7 MPa - Bending stress, p_b = 33.0 Mpa
Weld residual stress distribution	$\sigma(y/t) = 392 - 3645\,(y/t) + 6946\,(y/t)^2 - 3541\,(y/t)^3$ MPa y: Distance from inner surface t: Thickness

た，初期亀裂長さは，町田[3]が実測値を統計処理し，その確率密度関数 $f_c(c)$を次式で示す対数正規分布として整理した値を用いた．

$$f_c\left(c\right)=\frac{1}{\sigma_c c\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln\left(c/\mu_c\right)}{\sigma_c}\right\}^2\right] \qquad (2\text{-}7)$$

ここで，μ_c = 11.82 およびσ_c =0.977 である[3]．その他の確率変数は既報[12]と同じものを用いたので詳細は割愛する．負荷応力も，既報[12]と同じく通常運転時の応力および溶接残留応力を想定した．解析対象，確率変数および負荷応力をそれぞれ表 2-2，2-3 および 2-4 に示す．解析コードは電力中央研究所にて開発した PEDESTRIAN [7]を用いた．試行回数を 10^7 回として解析を行い，亀裂が管厚の 75%に達した時点で亀裂貫通と判断する．また極限荷重法による破壊評価も行ったが，本解析において破壊に至る事例はなかった．

運転時間に伴う亀裂貫通確率の推移を図 2-4 に示す．同図より運転時間が 0 年から 30 年頃までは，亀裂深さとして正規分布を仮定した結果よりも，安定分布を仮定した結果の方が高い亀裂貫通確率で推移している．これは図 2-3 で示した裾野の厚さの違いによるものと考えられ，正規分布と比較して安定分布ではより深い亀裂が初期亀裂としてサンプリングされた結果と考えられる．運転時間が 30 年以後になると，両分布の結果の差は小さくなる．これは時間の経過と共に，亀裂貫通確率へ寄与する初期亀裂深さが比較的浅いものへとシフトしていったことから，両者の差が小さくなっているものと考えられる．これらの考察を裏付けるため，板厚の 75%を超える初期亀裂がサンプリングされる確率を生存関数より計算した．生存関数は次式で与えられる．

$$S\left(x\right)=1-F\left(x\right)=\int_x^{\infty} f\left(t\right)dt \qquad (2\text{-}8)$$

ここで，$F(x)$は累積分布関数である．上式に従い，安定分布および正規分布を用いたときの板厚の 75%を超える亀裂がサンプリングされる確率は，それぞれ 1.56×10^{-3} および 1.81×10^{-28} であった．前者は図 2-4 に示す安定分布を用いた解析の運転時間 0 年の亀裂貫通確率とほぼ等しく，上述した考察を裏付けている．

図 2-4 から，初期亀裂深さのばらつきを表す確率分布の裾野の厚さは，亀裂貫通確率に大きく影

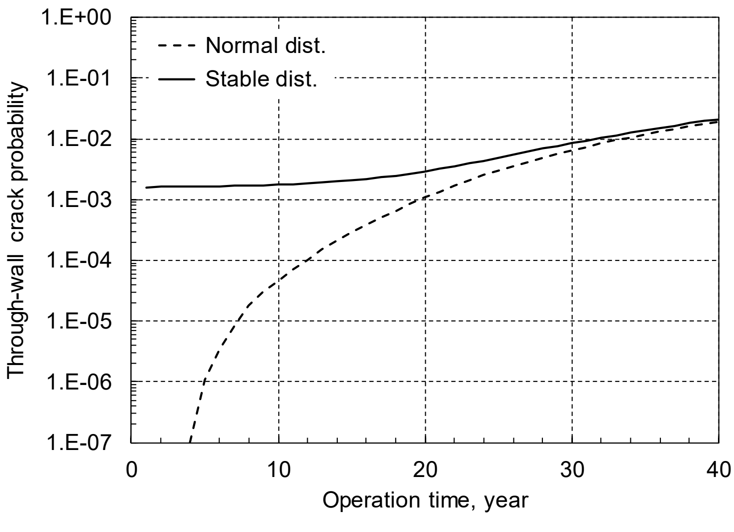


図 2-4　亀裂深さ分布の違いによる亀裂貫通確率への影響
Figure 2-4 Effect of difference in initial crack depth distribution on through-wall crack probability

響していると言える．しかしながら，文献[3]に示す亀裂深さ分布は，複数プラントの異なる配管の異なる溶接部から異なる時期に得られたものであり，同分布をある時点の亀裂深さ分布と仮定することは正確とは言えない．そこで，次章では亀裂発生を考慮した PFM 解析を行い，供用期間中に発生する亀裂の深さ分布を得て，これを用いた PFM 解析を行うことより，本章の結果の妥当性を確認する．

3. 亀裂発生を考慮した PFM 解析による供用期間中の亀裂深さ分布

本章では，亀裂発生を考えた PFM 解析を実施し，供用期間中に発生した亀裂の深さ分布を調べる．また，得られた分布を正規分布もしくは安定分布によりモデル化し，これを初期亀裂深さ分布と仮定した PFM 解析を行う．

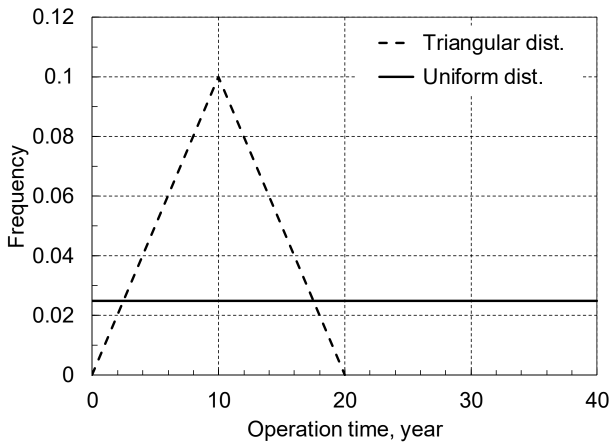


図 3-1　亀裂発生時間の確率密度関数
Figure 3-1 Probabilistic density functions of crack initiation time

3.1 亀裂発生を考慮した PFM 解析

町田ら[13]は，国内 BWR プラントで検出された SCC 亀裂寸法の実測値からその発生時間を算出しており，その頻度は運転開始後，徐々に増加

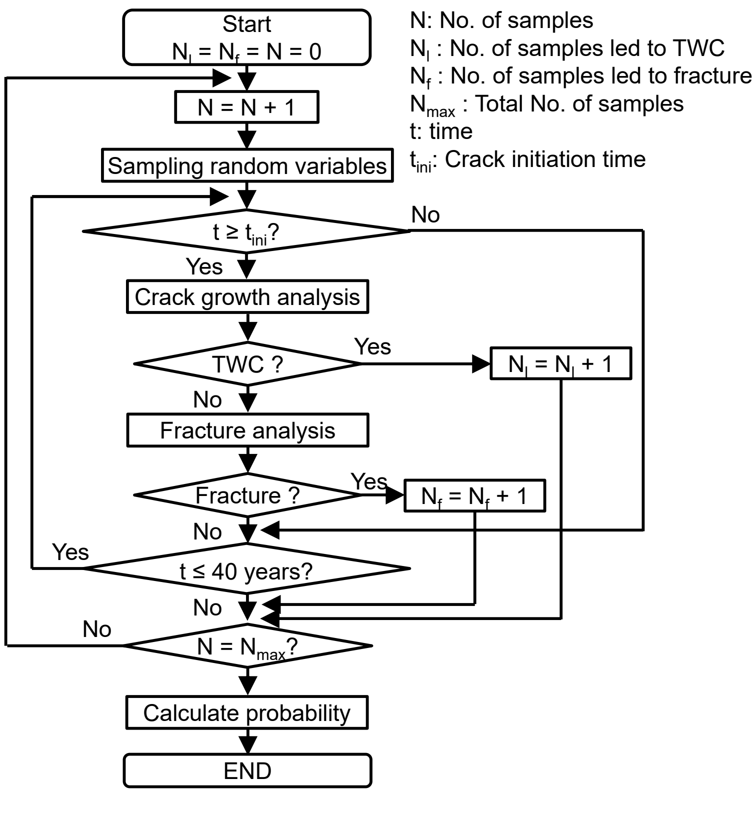


図 3-2　亀裂発生を考慮した PFM 評価フロー
Figure 3-2 PFM evaluation flowchart considering crack initiation

し，10 年前後をピークにその後は徐々に減少し，20年後にはほぼ0となっている．SCC亀裂の発生時間がこのような分布となる理由は明らかにされていないが，文献[13]ではこれを対数正規分布としてモデル化している．

本報では，SCC 亀裂発生分布を単純化し，SCC亀裂の発生頻度を運転開始時と20年後を0とし，運転開始 10 年後にピークとなるような三角分布として与える．また，さらに単純化し，運転開始から 40 年間の亀裂発生頻度を一定とするモデルについても検討する．図 3-1 に亀裂発生時間の確率密度関数を示す．発生後の初期亀裂深さは 1 mm とし，初期亀裂長さは半円状亀裂となるように決定した．亀裂発生を考慮し，発生後の亀裂寸法を固定値として扱う以外は 2.2 節で示した解析条件と同じとした．亀裂発生を考慮した PFM 評価フローを図 3-2 に示す．解析コードは前述した PEDESTRIAN を改良したものを用いた．解析の結果，極限荷重法により破壊に至ったサンプルはなく，破壊と判定されサンプルは全て亀裂貫通よるものであった．運転時間に伴う亀裂貫通確率の推移を図 3-3 に示す．同図より，亀裂発生時間として三角分布または一様分布のいずれを用いても，亀裂貫通確率の差はほとんどなかった．また，図 3-4および3-5は，それぞれ亀裂発生時間として三角分布および一様分布を用いたときの運転開始 10 年後および 20 年後の亀裂深さ分布を示し，同分布を正規分布または安定分布により推定した分布も併せて示す．ただし，ここでは既に貫通と判定された亀裂は，正規分布または安定分布のパラメータ推定に用いていない．同図より，図 3-4 (b)を除くと，正規分布と安定分布がほぼ同じ分布となっている．一方で図 3-4 (b)，すなわち三角分布により亀裂発生時間をモデル化した解析の運転開始 20 年後の亀裂深さ分布は，安定分布でモデル化した方が正規分布より若干裾野の厚い分布となる．

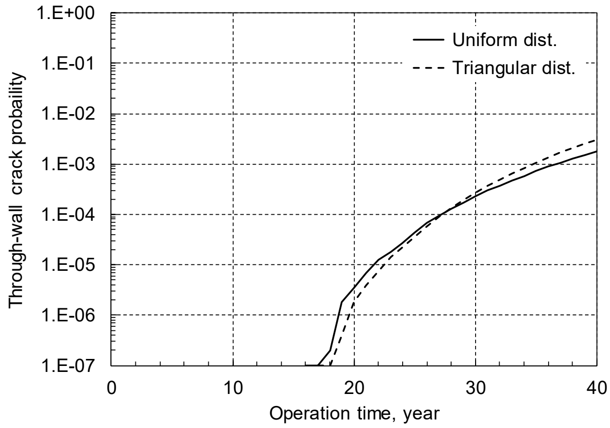


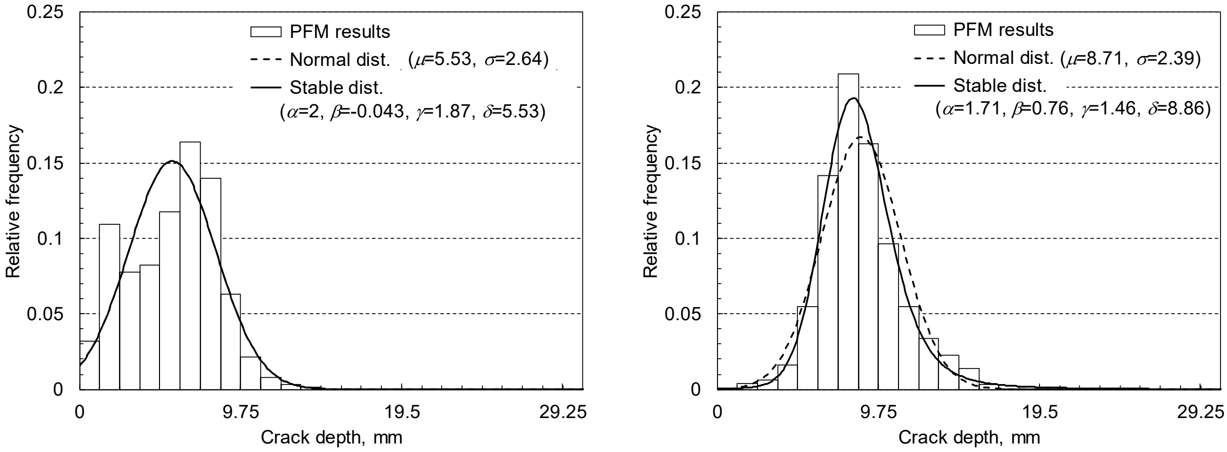
図 3-3　亀裂発生時間分布の違いによる亀裂貫通確率への影響

Figure 3-3 Effect of difference in crack initiation time distribution on through-wall crack probability

3.2　解析により得られた供用期間中の亀裂深さ分布を用いたPFM解析

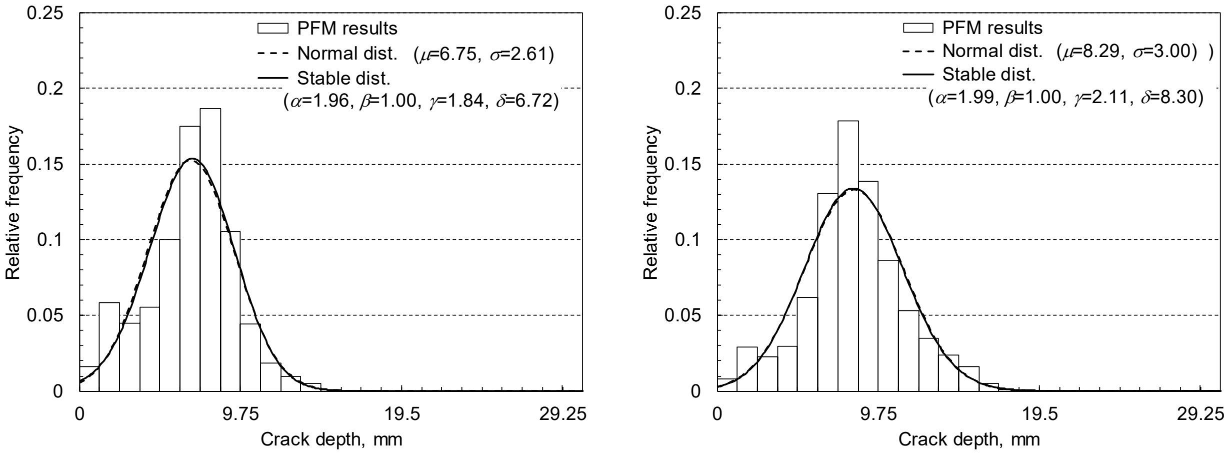
本節では，前節で得られた供用期間中の亀裂深さ分布をある時点の亀裂深さ分布と仮定して，PFM 解析を実施する．一様分布により亀裂発生時間をモデル化した解析では，正規分布または安定分布のいずれを用いてモデル化しても，ほぼ同じ分布となった．三角分布により亀裂発生をモデル化して得られた亀裂深さ分布のうち，運転開始 20 年後の分布は，正規分布と安定分布とで亀裂深さ分布が異なる．このため，この結果を用いた検討を行う．その他の条件は 2.3 節に示した解析と同じである．

図 3-6 に得られた亀裂貫通確率の推移を示す．同図は図 2-4 と同様な結果を示しており，亀裂深さ分布を表す確率分布の裾野の厚さは亀裂貫通確率に大きく影響している．しかしながら，図 3-7 に示す図 3-4 (b)の裾野の拡大図からは，安定分布が PFM 解析の結果得られた亀裂深さ分布の裾野を正確にモデル化しているとは言えない．確率分布にモデル化する際に用いられるサンプルの大部分は平均である 9 mm 前後に集中しており，これ



(a) After 10 years　　(b) After 20 years

図 3-4　供用中の亀裂深さ分布（三角分布）
Figure 3-4 Crack depth distribution during operation (Triangular distribution)



(a) After 10 years　　(b) After 20 years

図 3-5　供用中の亀裂深さ分布（一様分布）
Figure 3-5 Crack depth distribution during operation (Uniform distribution)

らのサンプルから推定される分布の裾野の厚さがどれだけの信頼性を有しているのかを評価することは，今後の課題である．

4. 結　言

本報では，PFM 評価において確率分布の裾野に着目した研究として，実測された亀裂深さ分布や，亀裂発生を考慮した PFM 解析の結果得られる亀裂深さ分布を，裾野の厚い分布として知られる安定分布でモデル化し，確率分布の裾野の形状が破壊頻度に及ぼす影響を調べた．得られた結論は以下の通りである．

1. 国内 BWR プラントの PLR 配管溶接部にて検出された SCC 亀裂の深さ分布を，正規分布または安定分布としてモデル化し，これを初期亀裂深さ分布と仮定して PFM 解析を実施した．その結果，運転時間が 0 年から 30 年頃までは正規分布を用いた結果と比較すると安定分布を用いた結果の方が高い亀裂貫通確率で推移する．これは安定分布の裾野が正規分布のそれと比較して厚く，安定分布の方が深い亀裂が多数サンプリングされるためと考えられる．

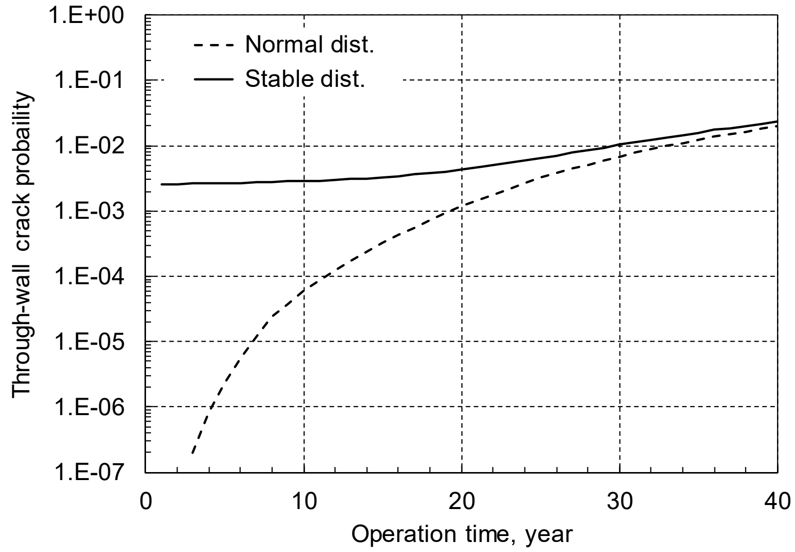


図 3-6　亀裂発生時間分布の違いによる亀裂貫通確率への影響
Figure 3-6 Effect of difference in crack initiation time distribution on through-wall crack probability

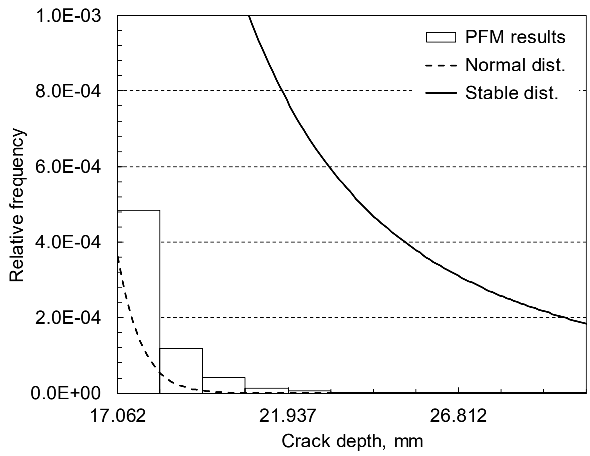


図 3-7　PFM 評価に用いた確率分布の裾野の形状
Figure 3-7 Tails of probabilistic distribution used in PFM evaluation

2. 亀裂発生を考えた PFM 解析を実施し，供用期間中に発生・成長した亀裂の深さ分布を調べた．その結果，亀裂発生を一様分布で表した解析では，運転開始 10 年および 20 年の亀裂深さ分布は正規分布と安定分布とで差がなかった．一方で亀裂発生を三角分布で表した解析では，運転開始 20 年の亀裂深さ分布について，正規分布と安定分布とでモデル化した場合に差が生じた．
3. 上記 2 で得られた運転開始 20 年後の亀裂深さ分布を初期亀裂深さ分布と仮定して PFM 解析を実施した．その結果，運転時間 0 年から 30 年では正規分布を用いた結果と比較すると安定分布を用いた結果の方が高い亀裂貫通確率で推移していた．
4. 上記 1 および 3 に示した結果より，今回の解析条件では，亀裂深さのばらつきを表す確率分布の裾野の厚さは，亀裂貫通確率に大きく影響していることが示された．しかしながら，確率分布を推定される際に用いられるサンプルの大部分は平均前後に集中しており，これらから推定される裾野の厚さの信頼性を評価することは今後の課題である．

参考文献

[1] Harris, D. O., Dedhia, D. D. and Lu, S. C., Theoretical and user's manual for pc-PRAISE: A probabilistic fracture mechanics computer code for piping reliability analysis, NUREG/CR-5864, 1992.

[2] Scott, P., Kurth, R., Cox, A., Olson, R. and Rudland, D., Development of the PRO-LOCA Probabilistic Fracture Mechanics Code, MERIT Final Reoprt, SSM-2010-46, 2010.

[3] 町田秀夫，“SCC き裂を有する配管の信頼性に対する非破壊検査性能の影響”，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 77, pp. 1798-1813, 2011.

[4] Williams P. T., Dickson, T. L. and Yin, S. Fracture Analysis of Vessels – Oak Ridge FAVOR, v12.1, Computer Code: Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2012/567, 2012.

[5] Rudland, D., Harrington, C. and Dingreville, R., Development of the Extremely Low Probability of Rupture (xLPR) Version 2.0 Code, Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2015), PVP2015-45134, 2015.

[6] 勝山仁哉，眞崎浩一，宮本裕平，李銀生，原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL4 の使用手引き及び解析手法（受託研究），JAEA-Data/Code 2017-015, 2018.

[7] 永井政貴，三浦直樹，山本真人，復元抽出による確率論的破壊力学コードの開発，電力中央研究所報告 Q15003, 2016.

[8] 蓑谷千凰彦，統計分布ハンドブック増補版，朝倉書店，2010.

[9] 磯貝孝，切断安定分布による資産収益率のファットテイル性のモデル化と VaR・ES の測定手法におけるモデル・リスクの数値的分析，日本銀行ワーキングペーパーシリーズ，No. 13-J-3，2013.

[10] 四辻哲章，計算機シミュレーションのための確率分布乱数生成法，プレアデス出版，2010.

[11] 原子力安全・保安院，炉心シュラウド及び原子炉再循環系配管の健全性評価について，2004.

[12] 永井政貴，三浦直樹，東海林一，確率論的破壊力学評価を活用した配管健全性評価－破損確率に対する欠陥検出能力の影響評価－，電力中央研究所研究報告 Q16007，2017.

[13] Machida, H. and Yamashita, N., Effect of Crack Detection Performance and Sizing Accuracy on Reliability of Piping with Stress Corrosion Cracks, Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2008), PVP2008-61017, 2008.

CRIEPI

Central Research Institute of Electric Power Industry

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
材料科学研究所長
神奈川県横須賀市長坂2-6-1
e-mail msrl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行･著作･公開 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1

ISBN978-4-7983-1776-2