



信頼性評価に基づいた原子力配管の保全手法の提案

Proposal of nuclear power plant piping maintenance method
based on reliability evaluation

株式会社テプコシステムズ 町田秀夫 Hideo MACHIDA Non Member

When cracks are found in nuclear power plant piping, the integrity during the evaluation period is secured using the Rules on Fitness-For-Service of the JSME (the Rules on FFS), and continuous operation is allowed while leaving cracks if satisfying the criteria. This paper focuses on the reliability of crack evaluation using the Rules on FFS and proposes inspection and evaluation methods to satisfy the target reliability. The sufficient reliability cannot be obtained by employing safety factor or limitation of crack depth due to variations in inspection and evaluation particularly when the pipe diameter is small or the crack angle is large. Prediction accuracy of the crack depth is very important to keep the sufficient reliability. Reliable crack evaluation is achieved by performing successive inspections defined by the rules on FFS and re-predicting the crack size to envelope the actual crack size based on the successive inspection results.

Keywords: Crack evaluation, Successive inspection, Reliability, Fitness-for-service, Fracture probability

1. 緒言

供用期間中の原子力配管は、日本機械学会の維持規格 [1] に基づく検査及び評価によって健全な状態に保たれる。維持規格は亀裂による破壊が生じないように、検査や評価の手法、及びクライテリアを規定している。亀裂を有する管の健全性評価では、無亀裂の管の健全性評価で考慮される寸法公差や破壊強度のばらつきに加え、亀裂寸法測定や進展予測のばらつきも考慮しなければならない。亀裂寸法測定や進展予測のばらつきは寸法公差や破壊強度のばらつきに比べて大きい。これまで一般に用いられてきた決定論的評価では安全側な想定を積重ねることにより過剰な裕度を与えてしまう場合や、反対に条件想定への難しさから適切な裕度を確保できない場合が想定される。

近年、原子力発電設備の規制や維持・管理にリスク情報を活用する方針が示され、冷却材喪失事故や溢水源となる配管破損を確率論的に評価することが従来にも増して重要となっている。モンテカルロ法や信頼性評価法のように、破壊確率（又は信頼度）を評価する手法の開発が進む一方で、これまで維持規格の規定の妥当性を信頼度の観点で示した例はない。そこで、この研究では拡張一次近似二次モーメント法（Advanced First Order Second Moment Method: AFOSM） [2] を用いて維持規格の亀裂評価に含まれる様々なばらつきを考慮した場合の信頼度を

評価し、支配因子を明らかにするとともに、信頼度の確保を目的とした維持規格の検査及び評価方法について提案する。

2. 信頼性評価手法

維持規格には、極限荷重評価法、弾塑性破壊力学評価法、2パラメータ評価法、2倍勾配法などの破壊評価法が規定されているが、亀裂寸法と破壊強度の関係が最も把握しやすいことから、この研究では周方向表面亀裂を有する管の極限荷重評価法を対象に信頼性評価を実施する。周方向亀裂を有する管の極限荷重評価法は、次の式で表される [1]。

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \quad (2)$$

ただし、 $(\theta + \beta) > \pi$ の場合は亀裂面の一部が圧縮応力場に入ることを考慮して次の式を用いる。

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 - \frac{a}{t} \right) \sin \beta \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2 - (a/t)} \left(1 - \frac{a}{t} - \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \quad (4)$$

連絡先: 町田秀夫、〒135-0034 東京都江東区永代 2-37-28
澁澤シティプレイス永代、株式会社テプコシステムズ
E-mail: machida-hideo@tepsys.co.jp

ここで、 a は亀裂深さ、 t は管厚さ、 θ は亀裂半角度、 P'_b は塑性崩壊時の曲げ応力、 σ_f は流動応力、 P_m は一次膜応力、 β は曲げ中心軸から中立軸までの角度である。これらのパラメータのばらつきの影響を考慮した極限荷重評価法の信頼度を AFOSM によって評価する。信頼性評価に用いる限界状態関数 (G) は、次のとおりとする。

$$G = P'_b - P_b \quad (5)$$

ここで、 P_b は亀裂断面に作用する一次曲げ応力である。AFOSM では、限界状態関数 (G) が負となる確率が破壊確率 (P_{fail}) となり、 $1 - P_{fail}$ が信頼度となる。信頼性評価では、(5)式を Fig. 1 に示す標準正規化座標上に置き換えることで、信頼度の評価を容易にしている。

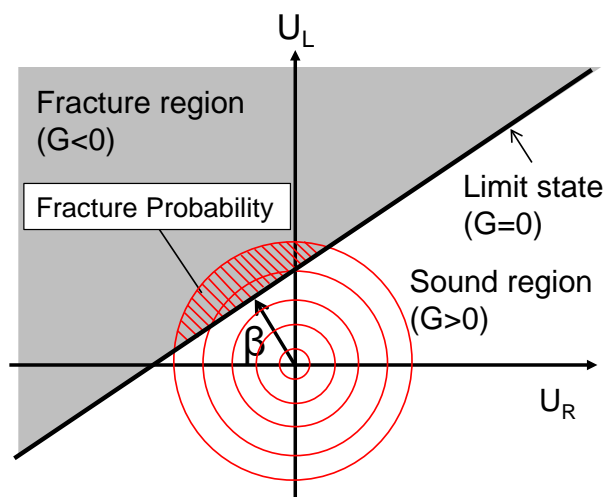


Fig. 1 Limit state conditions and fracture probability

標準正規化座標上の塑性崩壊時の曲げ応力 (U_R) 及び作用曲げ応力 (U_L) は、それぞれ次の式で表される。

$$U_R = \frac{P'_b - \mu_{P'_b}}{\sigma_{P'_b}} \quad (6)$$

$$U_L = \frac{P_b - \mu_{P_b}}{\sigma_{P_b}} \quad (7)$$

ここで、 μ_x は確率変数 x の平均、 σ_x は確率変数 x の標準偏差である。(6)式及び(7)式を用いると、(5)式は次の式で書き換えることができる。

$$G = (\sigma_{P'_b} U_R + \mu_{P'_b}) - (\sigma_{P_b} U_L + \mu_{P_b}) \quad (8)$$

信頼度指標 (β) は Fig. 1 の原点から限界状態局面 ($G = 0$) までの最短距離、つまり原点から(8)式の直線への垂線の距離に等しく、次の式で表すことができる。

$$\beta = \frac{\mu_{P'_b} - \mu_{P_b}}{\sqrt{\sigma_{P'_b}^2 + \sigma_{P_b}^2}} \quad (9)$$

β が求まると、破壊確率は次の式を用いて求めることができる。

$$P_{fail} = 1 - \Phi(\beta) \quad (10)$$

ここで、 Φ は正規分布の累積関数である。

破壊に対して影響の大きい確率変数は、次に示す部分安全係数 (PSF) の大きさと判断することができる。

$$PSF_{\sigma_f} = \frac{\mu_{\sigma_f}}{\sigma_f^*}, \quad PSF_a = \frac{a^*}{\mu_a}, \quad PSF_{\theta} = \frac{\theta^*}{\mu_{\theta}},$$

$$PSF_t = \frac{\mu_t}{t^*}, \quad PSF_{P_b} = \frac{P_b^*}{\mu_{P_b}} \quad (11)$$

ここで、アスタリスクは目標破壊確率を満足する各確率変数の値 (設計点) を示す。PSF の大きさは、各確率変数の破壊確率に対する影響度の大きさと対応する。

3. 亀裂寸法が信頼度に及ぼす影響

3.1 目標信頼度

国内の原子力発電設備では、未だ設備の重要度に応じた目標信頼度は設定されていないが、海外の原子力発電設備や圧力設備の亀裂評価基準では、リスクを考慮し設備の重要性やシステムの冗長性に基づいた目標信頼度が提案されている。例えば、仏の亀裂評価規格[3]では、供用状態 A の不安定破壊に対して $10^{-6}/y$ 、米国石油協会の亀裂評価規格[4]では、設備の重要度に応じて $2.3 \times 10^{-2}/y \sim 10^{-6}/y$ 、英国の鋼構造物の亀裂評価規格[5]では、重要度が高く冗長性がない機器に対して $10^{-5}/y$ といった値が提案されている。原子力発電設備のクラス 1 配管は、これらの中でも最も厳しい値が求められると考え $10^{-6}/y$ を破損頻度の目安とする。ここで、クラス 1 配管の供用状態 A (通常運転状態) の発生頻度は $1/y$ となることから、目標破壊確率は 10^{-6} となる。

3.2 信頼性評価条件

維持規格を適用した管の破壊評価では、管の寸法公差、亀裂寸法の予測精度、破壊強度などのばらつきが存在する。これらのばらつきを考慮した信頼性評価の条件を Table 1 にまとめる。この評価条件は管材料を加圧水型原子炉 (PWR) 及び沸騰水型原子炉 (BWR) の配管材として広く用いられている SUS316 とし、評価温度を 300°C と

Table 1 Analytical conditions

Parameter	Distribution	Mean	COV*	Ref.
σ_f	Normal	317(MPa)	0.100	[6]
a	Normal	Input	2/mean	[7]
θ	Normal	Input	6/mean	[7]
t	Normal	Input	0.042	[8]
P_m	Normal	-	0.045	[9]
P_b	Normal	Input	0.15	[9]

Note) *: Coefficient of variation

仮定したものである。流動応力の平均及びばらつきはステンレス協会の試験データ[6]のうち 300℃の試験データを Table 2 のように統計処理して求めた。流動応力の平均は、降伏点 (σ_y) と引張強さ (σ_u) との平均としたが、標準偏差はばらつきが大きい降伏点 (σ_y) の標準偏差で代表させた。亀裂深さ (a) と角度 (θ) のばらつきは測定誤差であり、これらは管径及び管厚さの影響を受けないという過去の研究成果[7]から、Table 1 に示す誤差を全ての口径及びスケジュールの管の信頼性評価に用いた。管厚さのばらつきは、JIS 規格の寸法公差[8]である $\pm 12.5\%$ を $\pm 3\sigma$ と仮定して標準偏差 (σ) を計算した。作用応力のばらつきについては、米国機械学会の検討成果[9]を引用した。一次曲げ応力 (P_b) と一次膜応力 (P_m) の変動係数 (COV, 標準偏差と平均の比) を比べると、 P_b のほうが大きいことから、信頼性評価では P_b のみが作用する純曲げ応力条件を仮定した。作用応力は、維持規格の供用状態 A 及び B に規定する安全率 (SF) である 2.77 を考慮し、管形状及び亀裂形状に応じて次の式を用いて算出される許容曲げ応力 ($P_{b,allow}$) とした。ここで、安全率 (SF) は維持規格の規定値であり、(11)式の部分安全係数とは異なる。

Table 2 Distribution of fracture strength

Strength	Mean (MPa)	Standard deviation (MPa)
Yield stress, σ_y	166	31.8
Ultimate tensile strength, σ_u	469	31.3
Flow stress, σ_f	317	31.8*

*) Standard deviation of σ_y is used in this study because it is larger than that of σ_u .

$$P_{b,allow} = \frac{1}{SF} \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \quad (12)$$

ただし、 $(\theta + \beta) > \pi$ の場合は亀裂面の一部が圧縮応力場に入ることを考慮して次の式による。

$$P_{b,allow} = \frac{1}{SF} \frac{2\sigma_f}{z} \left(2 - \frac{a}{t} \right) \sin \beta \quad (13)$$

Table 3 に示す小口径 (4B) から大口径 (26B) 管、スケジュールを 40, 80 及び 160 に対する信頼性評価を実施し、管口径や厚さが破壊確率に及ぼす影響を評価する。

Table 3 Dimensions of analyzed pipes

Nominal diameter	Outer diameter (mm)	Thickness (mm)		
		Schedule 40	Schedule 80	Schedule 160
4B	114.3	6.0	8.6	13.5
8B	216.3	8.2	12.7	23.0
12B	318.5	10.3	17.4	33.3
16B	406.4	12.7	21.4	40.5
20B	508.0	15.1	26.2	50.0
26B	660.4	18.9	34.0	64.2

3.3 亀裂角制限を設けない場合の信頼度

維持規格では、貫通に対する余裕を考慮して亀裂深さを管厚さの 75% に制限し、さらに亀裂が貫通しても破断前漏えい (LBB) が成立すること考慮して周方向亀裂の角度を 60 度以下に制限している[1]。しかし、米国の維持規格に相当する ASME Section XI では亀裂角度の制限はない[10]。また、試験結果との比較から、極限荷重評価法は評価条件 (管の寸法, 亀裂寸法, 流動応力など) が明確であれば、亀裂角度に拘らず適用可能であることが分かっている[11]。一方、実際の管の破壊強度は Table 1 に例示するばらつきの影響を受ける。そこで、亀裂深さを維持規格の制限値である管厚さの 75% とし、Table 1 のばらつきを考慮した場合の破壊確率を評価し、Fig. 2 に示す。破壊確率は管口径にかかわらず亀裂角度とともに増加する傾向にあり、特に小口径管において顕著となる。これは、総じて厚さが小さい小口径管では、亀裂寸法のばらつきが亀裂を除く断面積の大きなばらつきになるためである。また、ほとんどのケースで目標破壊確率である 10^{-6} を上回る。Fig. 2 において、管厚さがほぼ等しい 26B のスケジュール 80 (厚さ 34.0mm, Δ) と 12B のスケジュール 160 (厚さ 33.3mm, \diamond)、更に管厚さが等しい 16B のスケジュール 40 (厚さ 12.7mm, \times) と 8B のスケジュール 80 (厚さ 12.7mm, \square) の破壊確率が同等であることから、破壊確率は管厚さに概ね依存する。よって、これ以降の

検討はスケジュール 80 を代表として実施する。

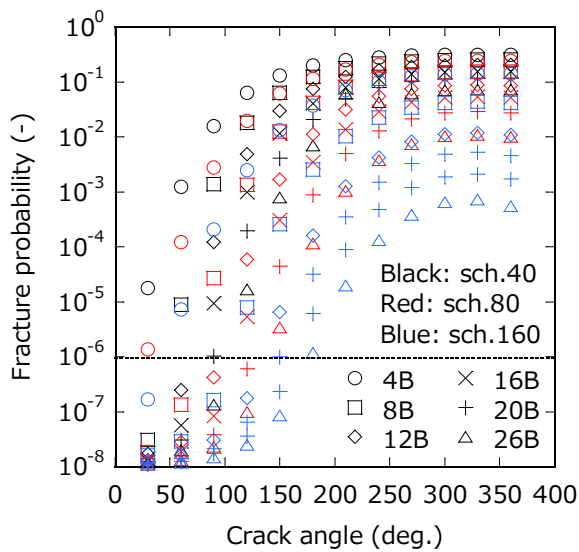


Fig. 2 Fracture probability in consideration of the variation of evaluation parameters

3.4 亀裂深さ制限を設けた場合の信頼度

維持規格の事例規格 CC-002「周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限の代替規定」の技術評価報告書[12]では、主に亀裂深さの測定誤差を懸念して、維持規格の亀裂角度制限である 60 度を超える亀裂に対して、Fig. 3 のような深さ制限を与えている。

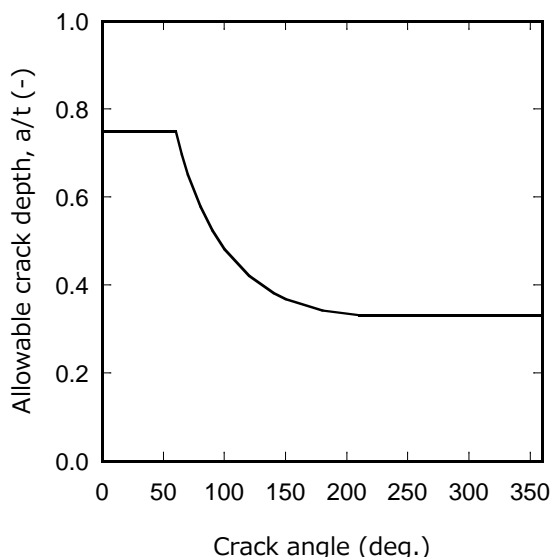


Fig. 3 Allowable crack depth according to the technical evaluation report [12]

亀裂深さを Fig. 3 の曲線とした場合の破壊確率を Fig. 4 の黒のプロットで示す。図中の青のプロットは亀裂深さを管厚の 75%とした場合の破壊確率 (Fig. 2 のスケジュール 80 の値) であり、以降の図も同様である。亀裂深さ制限を設ける効果は、大口径管において図中の青の矢印に例示するように明確に現れ、き裂角度が増加しても破壊確率の増加が抑えられる。一方、小口径管では図中赤の矢印で例示するように亀裂深さを制限しても亀裂角度の増加に伴って破壊確率が増加し、Fig. 3 のような亀裂深さの制限だけでは目標破損確率である 10^{-6} を満足することはできない。

を管厚の 75%とした場合の破壊確率 (Fig. 2 のスケジュール 80 の値) であり、以降の図も同様である。亀裂深さ制限を設ける効果は、大口径管において図中の青の矢印に例示するように明確に現れ、き裂角度が増加しても破壊確率の増加が抑えられる。一方、小口径管では図中赤の矢印で例示するように亀裂深さを制限しても亀裂角度の増加に伴って破壊確率が増加し、Fig. 3 のような亀裂深さの制限だけでは目標破損確率である 10^{-6} を満足することはできない。

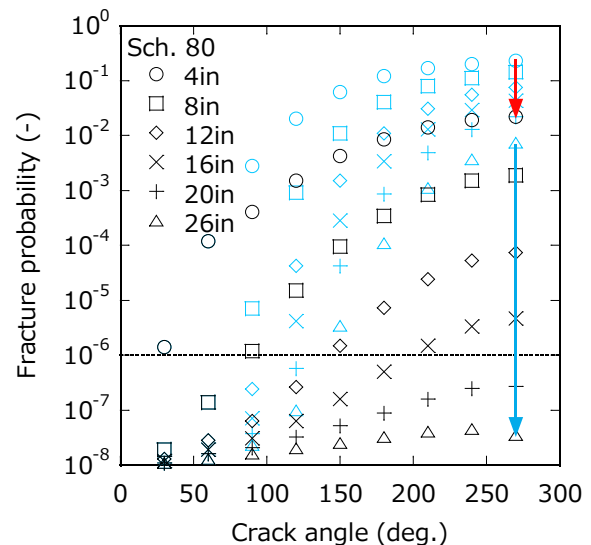


Fig. 4 Fracture probability when crack depth is limited according to technical evaluation report.

破壊に対して影響の大きい確率変数を把握するため、目標破壊確率を 10^{-2} に設定した場合の部分安全係数 (PSF) を求め、Table 4 に示す。亀裂角度が 60 度の場合、管厚さ (t) を除いた PSF は 1.1~1.4 の値となり、各確率変数が破壊確率に影響することが分かる。一方、亀裂角度が 360° の場合、Fig. 3 に示すように亀裂深さが制限されても亀裂深さ (a) の PSF が極端に大きく、その他の PSF が小さくなる。これより、亀裂角度が大きい場合の破壊確率は亀裂深さのばらつきに支配されることが分かる。

Table 4 Change of partial safety factors with crack angle

Crack angle	Parameters				
	σ_f	a	θ	t	P_b
60°	1.106	1.439	1.259	1.012	1.166
360°	1.053	2.569	1.000	1.010	1.040

3.5 亀裂深さを小さく制限した場合の信頼度

Fig. 4に示すように、Fig. 3に示す亀裂深さ制限では亀裂角度が大きくなると破壊確率が増加し、目標破壊確率を満足できないことが分かった。そこで、更に厳しい亀裂深さ制限を想定した場合の破壊確率を評価する。Fig. 5は、亀裂深さが管厚さの25%に制限された場合の破壊確率を示す。この場合、亀裂深さはFig. 3の制限と比べても浅く制限されるため、破壊確率はFig. 4に示した値よりも低くなる。しかし、亀裂を極端に浅く制限しているにもかかわらず、小口径管、例えば赤の矢印で例示する4B管の破壊確率はほとんど低下せず、亀裂深さの制限だけでは目標破壊確率である 10^{-6} を満足することはできない。

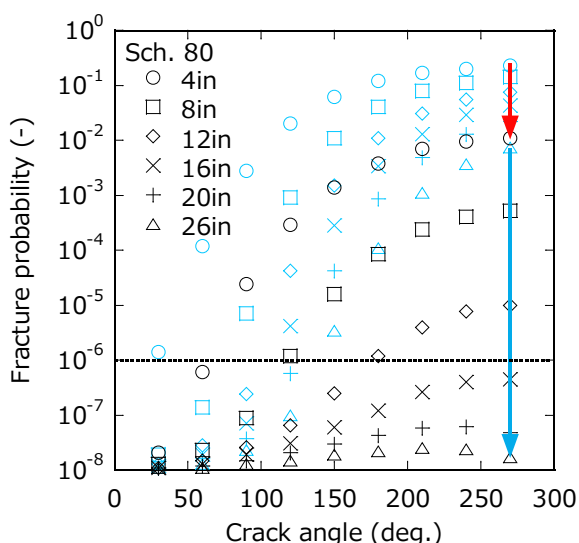


Fig. 5 Fracture probability when crack depth is limited to 25 percent of pipe thickness

3.6 大きな安全率を考慮した場合の信頼度

維持規格では、供用状態A及びBの破壊評価において、荷重に対する安全率2.77が考慮される。ここでは、その2倍の安全率5.54を荷重に対して考慮した場合の破壊確率を評価する。ただし、亀裂深さは維持規格の上限値である管厚さの75%と仮定した。破壊確率をFig. 6に示す。荷重に対する安全率を大きくすると、(12)式又は(13)式で与えられる許容曲げ応力($P_{b,allow}$)が減少する。これにより、亀裂角度が小さい場合には破壊確率が著しく低下するが、大口径管を含め亀裂角度とともに破壊確率も増加し、結果として亀裂深さを管厚さの25%に制限したFig. 5の結果よりも破壊確率が大きくなる。これは、亀裂の深さの平均を管の厚さの25%から75%まで緩和した影響が安全率を高める効果よりも大きいことを示唆する。よって、荷重に対する安全率を大きく取り、許容応力を制限

するだけでは目標破壊確率を満足することはできない。

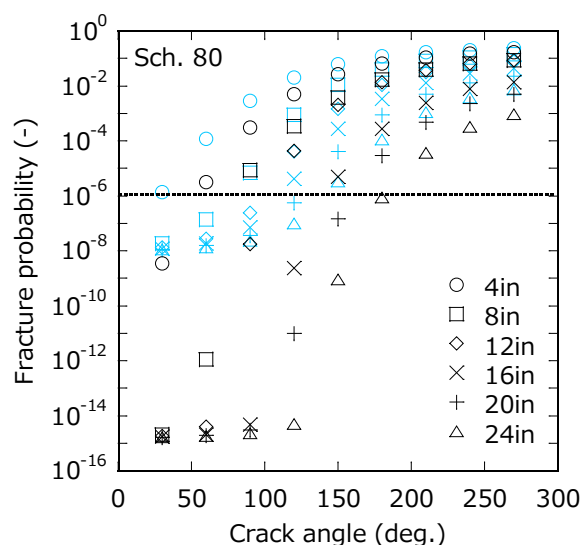


Fig. 6 Fracture probability when large safety factor is considered.

3.7 亀裂の測定精度向上を図った場合の信頼度

これまでの検討では、管厚さにかかわらず亀裂深さの測定誤差の標準偏差を2mmとし、破壊確率を評価した。ここでは、将来の亀裂寸法の測定装置の性能向上に期待し、亀裂深さ測定誤差の標準偏差を管厚さの5%に改善し、亀裂深さを管厚さの75%とした場合の破壊確率を評価する。評価結果をFig. 7に示す。この場合、亀裂深さの測定誤差の標準偏差は4B管で0.48mm、26B管で1.7mmであり、測定精度はこれまでの評価ケースに比べて向上している。(5)式の限界状態関数は管口径に依存しないことか

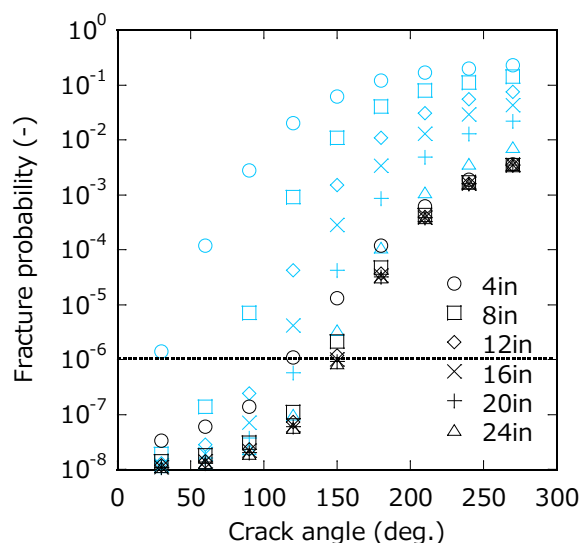


Fig. 7 Fracture probability when measurement error of crack depth is improved

ら、亀裂長さの寸法測定誤差の影響を受ける亀裂角度が小さい領域を除いて破壊確率は管口径の影響をほとんど受けない。4B 管の破壊確率は、最大 3.6×10^{-3} であり、Fig. 2 に示した標準偏差を 2mm としたケースよりも、約 2 桁低くなる。しかし、このように亀裂深さの測定精度を上げただけでは、目標破壊確率である 10^{-6} を満足することはできない。

3.8 亀裂寸法測定誤差が無視できる場合の信頼度

上記の 3.3 から 3.7 の検討では、亀裂寸法のばらつきに亀裂寸法測定誤差を用いていた。一方、維持規格を用いた亀裂評価には、評価者が任意に定める評価期間終了時点の亀裂寸法を進展評価によって予測した寸法が用いられる。この亀裂進展予測は、評価に用いる荷重、亀裂のモデル化、亀裂進展速度などが亀裂を大きく予測するように規定されている。これまで、BWR の再循環系 (PLR) 配管で多くの応力腐食割れ (SCC) が発生したが、それらの測定と予測値の比較でも、ほとんどのケースで予測値が実測データを包含すると報告されている[13]。しかし、亀裂検出時の進展予測に用いる初期亀裂の寸法を実際よりも小さく測定した場合、評価期間終了時点の亀裂寸法を実際よりも小さく予測する可能性を否定できない。維持規格では、このようなリスクに対応するため、管を補修又は取替せずに継続使用する場合には複数回の継続検査を実施し、評価期間中の亀裂寸法を確認することを規定している。また、継続検査において測定された亀裂寸法が予測を上回った場合、Fig. 8 に示すように測定結果に基づいて亀裂の進展予測を見直さなければならない[14]。

Fig. 8 のような継続検査と評価の効果を把握するため、供用期間中検査 1 回と継続検査を 1 回から 3 回 (計 2 回

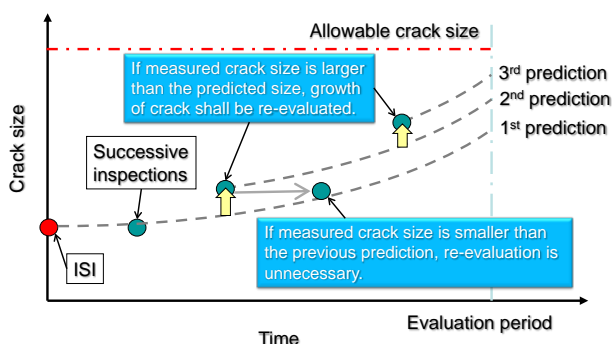


Fig. 8 Reduction of the influence of crack size measurement error by successive inspections and re-evaluation of predicted crack size

から 4 回の計測) 実施した場合に、全ての測定値が実寸法を下回る確率 ($P_{s.m.}$) と、測定値の最大値の平均 ($a_{n.m.}$) をモンテカルロ法を用いて評価した。ここで、サンプル数は 10^5 回とした。

【2 回の測定 (1 回の継続検査)】

$$P_{s.m.} = 0.25, \quad a_{n.m.} = +0.56\sigma$$

【3 回の測定 (2 回の継続検査)】

$$P_{s.m.} = 0.13, \quad a_{n.m.} = +0.85\sigma$$

【4 回の測定 (3 回の継続検査)】

$$P_{s.m.} = 0.06, \quad a_{n.m.} = +1.03\sigma$$

維持規格[1]や ASME Section XI [10]では、基本的に 3 回の継続検査が求められるが、継続検査を繰り返すことにより、全ての測定値が実寸法を下回る確率は 0.06 まで低下し、測定亀裂寸法の最大値を採用すると実寸法より平均で約 1σ 大きく測定される。これより、Fig. 8 のような継続検査に基づく亀裂寸法の見直しが実寸法を包含する上で有効であることが分かる。

Fig. 9 は、このような継続検査と亀裂寸法の再評価を行うことによって、亀裂寸法誤差が無視できると仮定した場合の破壊確率を示す。この場合、管口径は破壊確率に影響を及ぼさない。管厚さの変動係数 (COV_t) を JIS 規格[8]で規定されている製造公差に基づき 0.042 とした場合 (許容寸法公差 $\pm 12.5\%$ を $\pm 3\sigma$ と仮定) でも、破壊確率は亀裂角度が大きくなっても上記の 3.3 から 3.7 の評価例のように極端には増加しない。このように、亀裂評価の高い信頼度を確保するためには、継続検査結果に基づいて評価期間終了時点の亀裂寸法予測が実際の寸法を包含

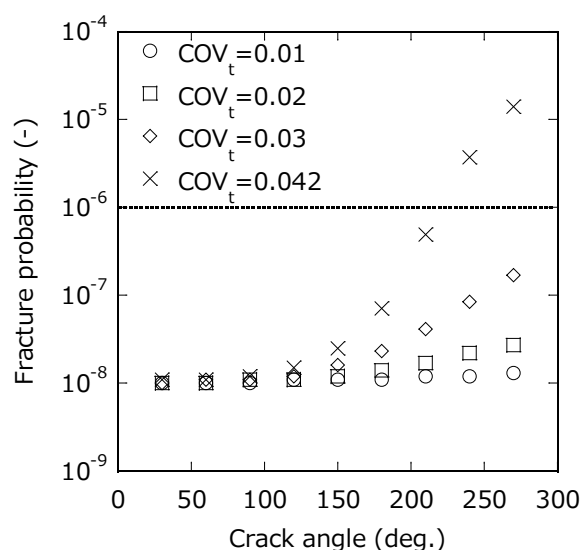


Fig. 9 Fracture probability when eliminating crack size error

するように見直すことが最も有効であることが分かる。

Fig. 10 は、目標破壊確率を 10^{-6} に設定した場合の PSF と亀裂角度の関係を示す。亀裂が小さい場合、流動応力及び曲げ応力の PSF が大きい、亀裂角度の増加とともにこれらの PSF は低下し、管厚さの PSF が増加する。亀裂角度が 250 度を超えると破壊確率は主に管厚さのばらつきに支配される。亀裂の予測寸法が実際の亀裂寸法を包含する場合、管厚さの測定精度も信頼度を向上（破壊確率を低下）において重要となることが分かる。

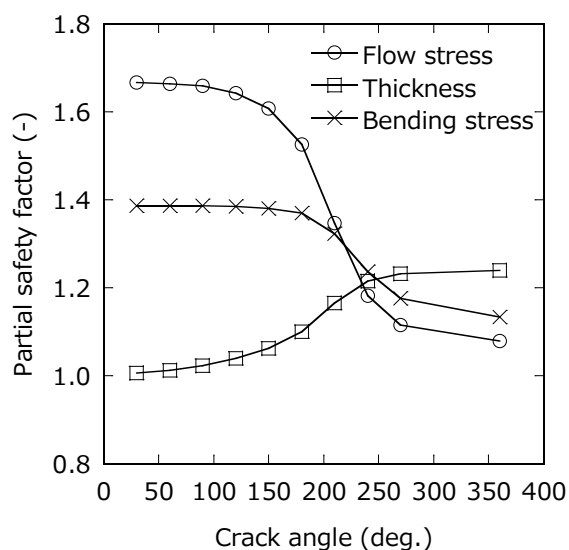


Fig. 10 Partial safety factors for $COV_t = 0.042$

維持規格に基づいた亀裂評価を実施する場合、別途管厚さも測定されるが、管厚さは管内表面からの反射エコーを測定するため、亀裂の寸法測定と比べて高い精度をもつ。これを考慮し、管厚さの変動係数 (COV_t) を 0.01, 0.02 及び 0.03 とした場合の破壊確率を評価し、Fig. 9 に併せて示した。これより、管厚さの測定精度の標準偏差が管厚さの 3% 以下であれば、破壊確率は目標値である 10^{-6} を下回ることが分かる。

4. 維持規格への提案

維持規格に基づく亀裂評価の信頼度を亀裂角度に関係なく向上させるには、評価期間終了時点の亀裂寸法の予測が実際の亀裂寸法を包含すること、及び管厚さが精度よく測定されることが重要であることが分かった。維持規格の検査及び評価は、これらの条件が満足するように規定されることが肝要である。実際には、検査及び評価のばらつきをなくすことは不可能であり、1 回の亀裂寸法

測定とそれに基づく亀裂進展評価では十分な信頼度が得られない。継続検査はこの欠点を補う上で重要な役割を果たす。

維持規格に規定される亀裂進展速度を実際の亀裂進展速度が上回った場合、Fig. 8 に示すように継続検査に基づいて亀裂寸法を見直しても、亀裂の予測寸法が実際の亀裂寸法を下回る可能性がある。これを防止するため、継続検査によって亀裂寸法が複数回連続して予測寸法を上回った場合には、Fig. 11 に示すように測定寸法を包含するように亀裂進展速度を見直す規定を加え、次の継続検査及び評価方法を提案する。

- 1) 継続検査において測定された亀裂寸法が予測寸法を超える場合、測定された亀裂寸法に基づいて評価期間終了時点の亀裂寸法を再評価する。
- 2) 測定された亀裂寸法が予測値よりも小さい場合であっても、評価期間終了時点の亀裂寸法は見直さない。
- 3) 測定された亀裂寸法が 2 回連続して予測を上回る場合、以前に測定された亀裂寸法を包含する亀裂進展速度を仮定し、評価期間終了時点の亀裂寸法を再評価する。
- 4) 亀裂進展速度を変更して再評価を行った場合、その時点から新たな継続検査を開始する。

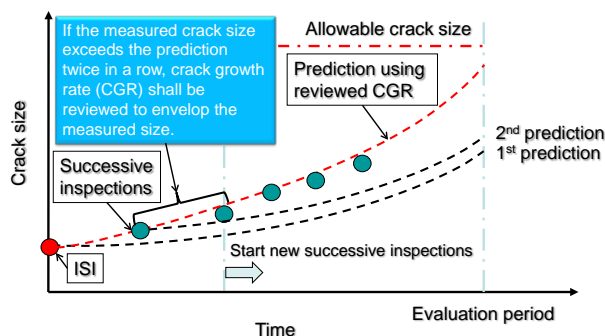


Fig. 11 Image of proposed crack size prediction method

5. 結言

周方向表面亀裂を有する管の破壊評価の信頼度を評価パラメータのばらつきを考慮して実施した。技術評価書に基づく亀裂深さの制限[12]、維持規格に規定される荷重に対する安全率[1]、今後の技術改善に期待した亀裂寸法測定精度の向上などの対策は、信頼度の向上に一定の寄与はあるが、これらの対策だけで十分な信頼度を得ることはできない。亀裂角度が大きい場合や小口径管では、破壊評価の信頼度は主に亀裂深さのばらつきに支配され、

評価に用いる亀裂寸法が実際の寸法をよりも小さくならないことで信頼度は向上する。

この信頼性評価結果に基づき、評価期間終了時点の予測亀裂寸法が実際の寸法を上回るように、継続検査の亀裂寸法測定結果に基づき、亀裂寸法予測の見直しと亀裂進展速度の見直しを行うことを提案した。これを確実に実施することにより、維持規格の亀裂評価の信頼度は格段に向上する。

謝 辞

本研究を取りまとめるに当たり、日本溶接協会 原子力研究委員会 PFM 小委員会の吉村主査、関東副主査をはじめ、委員の皆様には有益なご助言をいただいた。ここに報告すると共に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格 (2016年版), JSME S NA1-2016, (2016).
- [2] Hasofer, A. M. and Lind N. C., Exact and invariant second moment code format, Journal of Engineering Mechanics, ASCE Vol. 100, (1974), pp.111-121.
- [3] AFCEN, In-Service Inspection Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, (2017).
- [4] API, Fitness-for Service, API 579, (2000).
- [5] BSI, Guide to method for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, (2005).
- [6] ステンレス協会, ステンレス鋼の高温強度について, 「ステンレス誌」1979年12月号, (1979).
- [7] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書 (超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度に関するもの〔総括版〕, 平成17年4月, (2005).
- [8] JIS G3459, ステンレス鋼管, (2018).
- [9] ASME, Development of Reliability-Based Load and Resistance Factor Design (LRFD) Methods for Piping, CRTD-86, (2007).
- [10] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, (2019).
- [11] Machida, H. and Arakawa, M., Safety factor for flaw evaluation of a pipe having a circumferential surface flaw, Proceeding of ASME PVP Conference, PVP2015-45730, (2015).
- [12] 原子力・安全保安院, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 日本機械学会 「発電用原子力設備規格 維持規

格(JSME S NA1-2002) 【事例規格】周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限の代替規定(CC-002)」に関する技術評価書, (2007).

- [13] 齋藤利之, 高木俊輔, 浦邊守, BWR 再循環系配管溶接継手の SCC 亀裂進展解析と試験実施時期の検討, M&M2018 材料力学カンファレンス 講演論文集, OS1207, (2018).
- [14] 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉及びその付属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈の制定について, 制定 平成 26 年8月 6 日 原規技発第 1408063 号 原子力規制委員会決定, (2014).

(2019年10月11日受理、2020年1月7日採択)