

信頼性ベースの原子力配管肉厚の検討及び検査時期の予測

Study on Prediction of Thickness in Nuclear Reactor Piping and Estimation of Inspection Intervals by Applying Reliability-base Method

(株) I I U 凌 元錦 Yuanjin LING
 高瀬 健太郎 Kentaro TAKASE Member
 真木 紘一 Koichi MAKI Member
日本原子力発電(株) 肥田隆彦 Takahiko Hida

In the present study, time-dependency of the fracture probability by SCC in nuclear reactor piping was investigated and the inspection intervals for the fracture probabilities to be suppressed within the target one were predicted by application of reliability-based method to the nuclear reactor piping design.

From these investigations, the following results can be obtained; the thickness of the piping can be decreased less than the conventional one and the inspection plans can be reasonably performed considering the target fracture probability as the inspection standard one.

Keywords: Reliability-base Method、SCC、Inspection Interval、Fracture Probability

1. はじめに

米国では、リスク概念を導入した確率論的安全評価 (PSA) を原子力発電所の安全管理に利用し合理化を進めている。ASME Section XI (維持規格) については、すでに確率論を導入し合理的な保守管理に入っており、Section III (設計・建設規格) についても、今後確率論を導入した合理的な規格に改定していくことを計画している。

日本では、原子力配管設計においては、これまで ASME Section III を参考にして設計技術基準を定めてきた。現行の ASME の手法は主に決定論的な設計手法に準拠している。しかし、原子炉配管設計においては、荷重条件、材料特性や製造寸法などさまざまな不確かさを伴う。これまでの許容応力設計 (ASD) 法では決定論的な安全係数を用いて不確かさを扱ってきたため、場合によっては、過剰に保守的な設計となっており、個々の不確かさと安全裕度の関係が明確ではない。

一方、荷重条件、材料特性や製造寸法などさまざまな不確かさを考慮し、確率論を利用した信頼性ベースの設計手法は、建築、橋梁、港湾等の分野では、積極的に導入され、大きな成果を上げている。信頼性ベースの設計手法の建築構造での適用では 3~5% のコスト削減が示されている [1]。橋梁設計分野では、複数の限界

状態を同時に考慮し、信頼性ベースの手法を用いて様々な設計条件のもとで設計される RC 橋脚や場所打ち杭基礎などから構成される橋梁系の安全性の均一化問題について検討されている [2]。船舶・海洋構造物分野では、有限要素法、確率評価法および部材重要度評価手法を統合した数値シミュレーションに基づく総合的構造信頼性評価法の開発・適用に関する研究が行われている [3]。また、原子力分野では、確率論的破壊力学に基づく原子炉機器の定量的リスクベース評価についても検討されている [3]。信頼性ベースの設計手法の原子炉の配管設計および保全への適用により、次のような利点が考えられる。

- ① 安全裕度は破損確率を用いて定量的に明示できる。
- ② 破損確率を基準にした設計で安全裕度の合理的な配分が可能である。
- ③ 破損確率の時間依存性解析が可能で、これに基づいた保全計画の合理化が可能である。
- ④ 安全裕度を合理的に設定できるので、従来の許容応力設計法による配管肉厚に比べて薄くできる可能性があり、コストの削減に結びつく。

本研究は信頼性ベースの設計手法を計算コード化し原子炉配管設計に適用する。また、配管の SCC (Stress Corrosion Cracking: 応力腐食割れ) の進展による破損確率の時間増加を推定し、破損確率を目標破損確率以内に抑えるような検査時期の予測について検討する。

連絡先: 凌 元錦、〒110-0008 東京都台東区池之端 2-7-17 井門池之端ビル 7F、株式会社 I I U
電話: 03-5814-5350、e-mail: ling@iiu.ac.jp

2. 信頼性ベースの設計手法の概要

2.1 破損確率と信頼性指標

ここで、強度 X_R を持つ部材に荷重 X_L が作用した場合の破損確率の算出について説明する。 X_R 、 X_L はともに確率変数であり、図1に示すように強度 X_R の分布関数と確率密度関数を $F_R(x)$ 、 $f_R(x)$ 、荷重 X_L の分布関数と確率密度関数を $F_L(x)$ 、 $f_L(x)$ とする。

一般に図1のように、これらの確率密度曲線が交じる部分がある。荷重が強度を上回る場合、破損することになり、この破損する可能性の大きさを破損確率 P_f を用いて評価し、次式で与えられる。

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x) f_L(x) dx \quad (1)$$

実際には、材料の強度や荷重などの確率分布関数がわかることは一般に困難である。そこで、平均値と標準偏差を用いて安全性を評価するものとして信頼性指標が提案されている。信頼性指標 β は次のように定義される。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (2)$$

ここで、 $Z = X_R - X_L$ 、限界状態関数と呼ばれる。 μ_Z 、 σ_Z はそれぞれ Z の平均値および標準偏差である。

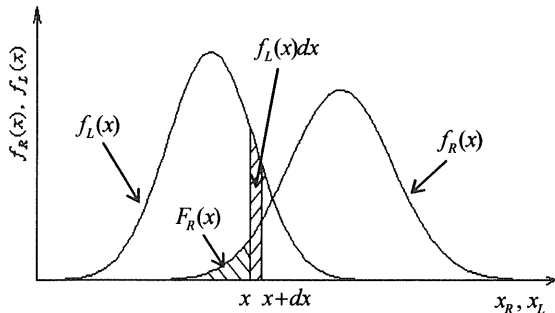


図1 破損確率の計算

信頼性指標 β の計算について、確率変数が正規分布にしたがう場合、FOSM (First Order Second Moment Method、1次近似2次モーメント) 法を用い、そうではない場合、AFOSM (Advanced First Order Second Moment Method、改良1次近似2次モーメント) 法を用いて近似計算することができる。

また、信頼性指標 β と破損確率 P_f の関係は近似的に次式で与えられる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (3)$$

ここで、 $\Phi(\bullet)$ は平均値0、標準偏差1の標準正規確率分布関数である。

3. 配管破損条件

信頼性ベースの配管設計において、材料の強度、肉厚、内径、内圧など設計パラメータが確率変数として扱われる。ASME Sec. IIIでは、配管の破損は①設計状態、②運転状態、③過度荷重状態、④緊急荷重状態の4つの破損条件が定義されている。例えば、①の設計状態では、設計圧力に対する配管の必要最小肉厚 t_m は、次式のように与えられる。

$$t_m = \frac{PD}{2S_m + 0.8P} \quad (4)$$

ここで、 S_m は許容応力 (MPa)、 P は内圧 (MPa)、 D は内径 (mm) である。

また、内圧と自重などを考慮する場合、これらの荷重により生じる曲げ応力による破損条件は、次式で表される。

$$B_1 \frac{PD}{2t} + B_2 \frac{M_A}{Z} \leq 1.5S_m \quad (5)$$

ここで、 M_A は配管の自重などによる断面モーメント ($N \cdot mm$)、 Z は断面係数 (mm^3)、 t は肉厚 (mm)、 B_1 、 B_2 は主応力指数で 0.5 と 1.0 である。許容応力 $S_m = \min(2S_y/3, S_u/4)$ 、 S_y は降伏応力、 S_u は極限強度である。

各設計確率変数の平均値と標準偏差がわかれば、AFOSM 法を用いて各破損条件に対応する破損確率が求められる。

4. 破損確率に基づいた検査時期の予測

SCC の進展により配管の破損確率が時間経過にともなって増加していく。ここで、「JSME 維持規格 2004」の SCC の進展速度予測式[5]を用いて SCC 深さの時間増加が計算することができる。また、SCC の深さを配管の全周減肉として考えて、AFOSM 法を用いて破損確率の時間増加が求められる。これにより、破損確率を目標破損確率以内に抑えるような検査時期の予測が可能である。

5. 計算例

ここで、実機データを用いて信頼性ベースの配管肉厚設計及び破損確率に基づいた検査時期の予測の例を示す。

[例Ⅰ] 配管の目標破損確率を予め設定し、破損確率を目標破損確率以内に抑えるように配管の肉厚を計算する。設計条件の統計特性を表1に示す。

表1 設計条件の統計特性

	平均値	標準偏差
外 径 (mm)	318.5	1.27
公称肉厚 (mm)	25.4	1.59
内 圧 (MPa)	13.32	0.66
降伏応力 (MPa)	323	29.1

配管材質：STPT480

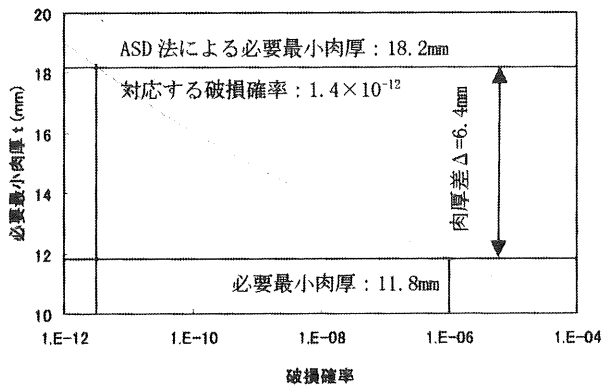


図2 破損確率に対応する肉厚の計算結果

現設計では、配管の必要最小肉厚が18.2mm（安全率が4.2である）となっている。一般的に、原子炉では、破損確率を $10^{-6} \sim 10^{-7}$ （本例の場合、従来のASD法の安全率2.25~2.97に相当する）としている[6]。これをカバーして、破損確率を $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ の間に变化させるとき、信頼性ベースの手法を用いて配管の肉厚を計算し、計算結果を図2に示す。図2より、要求された目標破損確率が 1.4×10^{-12} （安全率が4.2）より小さい場合、信頼性ベースの手法による設計は従来のASD法に比べて肉厚を薄くできる。文献[6]を参考に、要求された目標破損確率を 1.0×10^{-6} （安全率が2.25）と設定した場合、対応する必要最小肉厚が11.8mmとなり、ASD法に比べて6.4mm薄くできる。

[例Ⅱ] 原子炉再循環系配管ヘッダ管（400A、材質：材質：鋭敏化 SUS304）のSCCの進展による破損確率の増加の時間依存性を予測する。データの統計特性を表2に示す。この場合の予測結果を図3に示す。図3より、SCCの初期深さ a_0 （検査により初めて発見されたときのSCC深さの測定値）は破損確率の時間変化に大きく影響する。また、目標破損確率を 1.0×10^{-8} と設定し、目標破損確率を超えたときに検査を実施する場合に、SCCの初期深さ $a_0=3.0$ と 4.0 mmに対応する次の検査時期はそれぞれ11.8、8.5年であり、両者の差は3.3年となる。したがって、この a_0 の差が検査精度に対応していると考えられるならば、SCCの初期深さの検査精度は次回検査時期の予測に大きく影響し、検査精度の向上は次回の検査時期の合理化につながる。

以上の計算例より、信頼性ベースの手法を原子炉配管設計及び保全計画に適用することによりコストの削減に結びつく。

表2 設計条件の統計特性

	平均値	標準偏差
外 径 (mm)	406.4	2.44
公称肉厚 (mm)	26.0	1.63
内 圧 (MPa)	7.96	0.4
降伏応力 (MPa)	115	10.35

材質：鋭敏化 SUS304

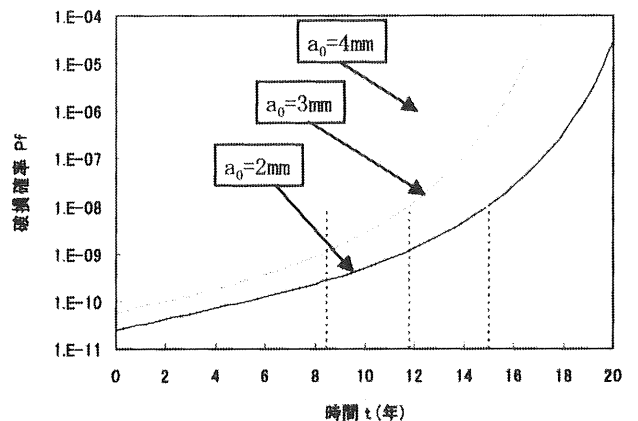


図3 破損確率の時間依存性の計算結果
(a_0 : SCC初期深さ)

6. 結言

本研究は、信頼性ベースの設計手法を原子炉配管設計に適用した。また、配管のSCCの進展による破損確

率の時間増加を推定し、破損確率を目標破損確率以内に抑えるような検査時期の予測について検討した。計算例により、以下の3点が言える。

- 1) 信頼性ベースの手法を用いて配管肉厚を計算するとき、目標破損確率に応じた合理的な肉厚設計が可能となり、従来の ASD 法より肉厚を薄くでき、コストダウンの可能性はある。
- 2) 破損確率に基づいた検査計画を策定する場合、SCC の初期深さの測定値は次回検査時期の予測に大きく影響する。
- 3) SCC の測定精度の向上は検査計画の合理化につながり、検査コスト低減の可能性はある。

参考文献

- [1] Adams. T. and Stevenson, J., 1997, "Differential Design and Construction Cost of Nuclear Power Plant Piping Systems as a Function of Seismic Intensity and Time Period of Construction," Welding Research Council Bulletin 426, November 1997.
- [2] 秋山充良、松中亮治、土井充、鈴木基行：構造系信頼性評価法と構造最適化手法を用いた RC 橋脚と場所打ち杭基礎間の耐力階層化に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol. 47A、pp. 743-752、2001
- [3] 日本溶接協会：確率論的破壊力学に基づく原子炉機器の定量的リスクベース評価の最新動向、2005
- [4] 岡田 博雄：崩壊モード解析に基づく大型撒積貨物船の構造信頼性評価に関する研究、日本造船学会論文集、No. 174、1993
- [5] JSME 日本機械学会：発電用原子力設備規格—維持規格（案）、2004
- [6] 清宮 理：構造設計概論、技報堂出版、2003