

超音波探傷試験員の力量向上が配管破損リスクの低減に及ぼす影響の評価

Effect of Ultrasonic Testing Examiners' Capability Improvements on Reduction of Piping Failure Risk

東京工業大学 小嶋 正義 Masayoshi KOJIMA Member
東京工業大学 高橋 秀治 Hideharu TAKAHASHI
東京工業大学 木倉 宏成 Hiroshige KIKURA

Ultrasonic testing (UT) is a part of maintenance program for essential equipment of nuclear power plants in in-service inspection (ISI). Analyses of probabilistic fracture mechanics (PFM) for welds of class 1 piping have been studied to evaluate piping failure risks. Probability of detection (POD) is one of the important input conditions in the PFM analysis. The POD is closely related to a capability of UT examiners; therefore it is anticipated that the capability improvement of UT examiners is related to the piping failure risk. The objective of this paper is to demonstrate effects of the capability improvement of UT examiners on the reduction of piping failure risk. A blind test was conducted twice at 11 week intervals by 2 examiners. The experimental results of PODs and cumulative failure probabilities were compared to evaluate relationships between the capability improvement of the 2 examiners and the piping failure risks. The results showed that the POD and the cumulative failure probability are useful for evaluating the capability improvement of UT examiners. In addition, it was demonstrated that the capability improvement affects the reduction of piping failure risk.

Keywords: Probability of Detection, Ultrasonic Testing, In-Service Inspection, Capability Improvement of UT Examiner, Probabilistic Fracture Mechanics, Cumulative Failure Probability, Piping Failure Risk

1. 序論

原子力発電所の主要機器に対する供用期間中検査 (ISI: In-Service Inspection) では、主に超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing) が実施される[1]。近年の国内研究で、ISI での検査間隔及び UT 試験員の欠陥検出確率 (POD: Probability of Detection) に関連し、確率論的破壊力学 (PFM: Probabilistic Failure Mechanics) を活用した配管破損確率の影響評価が実施されている[2, 3]。それらの研究では、UT 試験員の能力を式でモデル化した POD を、PFM の入力条件の一つとして設定し、PFM に基づく配管破損確率を解析し、配管破損リスクが評価されている。

著者らは既往研究[4]で、有資格試験員[1]と無資格試験員によるオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接接手の応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) に対する UT 結果を使用し、関数式でモデル化した POD 及び累積破損確率を算出した。その結果、UT 試験員の力量の差が、POD 及び累積破損確率により比較できることを示した。

本稿の目的は、UT 試験員の力量向上の評価における、関数式でモデル化した POD 及び累積破損確率の有効性の

実証である。また、力量向上に伴う配管破損リスク低減の実証である。既往研究[4]で UT 訓練及びブラインド試験に参加した UT 試験員が、同じ条件の実験を再度実施した。そして、実験 1 回目及び 2 回目の結果から、モデル化した POD 及び累積破損確率を算出し、UT 試験員の力量評価及び配管破損リスクへの影響評価を実施した。

2. 実験方法

実験 2 回目の概要を以下に記載する。実験 2 回目は、実験 1 回目と同じ条件で実施した。UT の訓練内容、ブラインド試験条件、PFM 解析条件等の実験方法の詳細は、既往研究[4]の第 2 章を参照されたい。

2.1 ブラインド試験の実施方法

実験 2 回目は、実験 1 回目の 11 週間後に実施した。また、実験 1 回目に参加した無資格の UT 試験員 9 名 (試験員 A~I) のうち 2 名 (試験員 A 及び B) で実施した。

試験員 A 及び B (試験員 AB) は、実験 2 回目でのブラインド試験の実施前に、実験 1 回目と同様の座学及び実技による UT の訓練を、一般社団法人発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センターで受講した。

ブラインド試験は、呼び径 350A の SUS304 配管突合せ溶接を短冊状に切断した試験体（ $\phi 355.6\text{mm} \times L400\text{mm} \times 14.5\text{deg}$ ）を使用した。試験体は、溶接接手内面側に作製した SCC の模擬欠陥を試験員 AB に隠すために、内面（裏波面）を木板で、側面（開先形状面）を布テープで養生した。溶接接手の開先断面形状と寸法（mm）を Fig.1 に示す。溶接施工法は、初層ティグ溶接及び 2 層目以降被覆アーク溶接である。試験体は 10 体で、うち 7 体に SCC が存在する。SCC の総数は 11 箇所、識別番号を UE001 ~ 011 と定義した。試験員 AB は、試験体 10 体から無作為に 4 体を選択し、ブラインド試験を行った。

試験ガイドは、JEAC 4207-2008[5]を参照した。探触子は、狭帯域 2MHz 45°横波射角を使用した。試験員 AB は、椅子に着座し、机上で UT を行った。ブラインド試験中は、エアコン温度を 24°C に設定した。UT 装置、試験体、探触子等の実験機材を机の上に設置した様子を Fig.2 に示す。

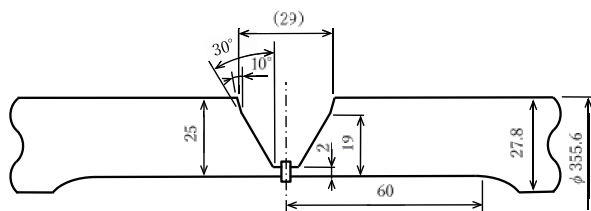


Fig.1 Weld groove shape of examinations [4]



Fig.2 Instrument, probe and test specimen in examinations

2.2 モデル化した POD の算出方法

ブラインド試験で得られた結果を使用し、式(1)で定義する変数 a の指数関数[6]でモデル化した POD を算出した。

$$POD(a) = 1 - \exp[-(a - \beta)]$$

$$se_{\beta}$$

$$RSS$$
(1)

ここで、 $a(\text{mm})$ は欠陥高さ、 $POD(a)$ は a での POD、 β は回帰係数、 se_{β} は β の標準誤差 (Standard Error)、 RSS は $POD(a)$ の残差平方和 (Residual Sum of Squares) である。

2.3 累積破損確率の算出方法

モデル化した POD を使用し、PFM により累積破損確率を算出した。また、 se_{β} は考慮しなかった。

解析対象は、ブラインド試験での配管板厚寸法 25.0mm を考慮し、公称肉厚が 26.2mm である呼び径 400A とした。材質は SUS316L とした。配管突合せ溶接の溶接熱影響部に模擬した SCC 進展の概念を Fig.3 に示す。

初期欠陥寸法は、高さ 0.01mm、長さ 0.02mm の半楕円形状とした。Fig.3 の dc は、溶接止端部からの距離 L (対数正規分布) と変数 α (正規分布) の和で算出される式を参照した[2, 7]。応力拡大係数は、非線形応力分布を 3 次多項式で近似した[8]。SCC 亀裂進展速度は、欠陥高さが dc までは鋭敏化 SUS304 鋼の式、 dc 以降は低炭素系ステンレス鋼の式 (対数正規分布) を参照した[2]。配管に作用する応力は、内圧、一次一般膜応力、一次曲げ応力及び熱膨張応力を参照した[7]。溶接残留応力は、400A 配管の有限要素法での解析結果を参照した[9]。

上記の入力条件により、検査間隔を 4, 5, 8 及び 10 年の 4 条件として、PFM により運転期間 40 年目の累積破損確率を算出した。ここで、欠陥高さ a が、配管厚さの 75% 以上に達した場合を配管破損と定義した[2, 3]。また、モンテカルロ法のサンプル数は 10^6 とし、累積破損確率の算出における 1 サンプル当たりの破損確率は、配管が破損した場合におけるすべての検査実施時期での欠陥不検出確率 ($PND=1-POD$) を乗じた値とした[10]。

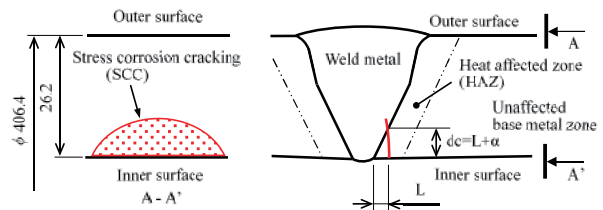


Fig.3 Concept of a SCC growth in HAZ and weld metal [4]

3. 実験結果

3.1 ブラインド試験の結果

試験員 AB による実験 1 回目及び 2 回目でのブラインド試験の結果を Table1 に示す。

3.2 モデル化した POD の結果

Table1 で示された結果を使用して、指数関数でモデル化した POD を式(2)及び(3)に示す。

Table 1 UT results of the 1st and the 2nd experiment

ID	Defect Height <i>a</i> (mm)	Probability of Detection 1st Expt. Results	Probability of Detection 2nd Expt. Results
UE001	7.5	1.0 (Examiner A)	1.0 (Examiner B)
UE002	2.0	—	1.0 (Examiner A)
UE003	8.0	—	1.0 (Examiner A)
UE004	2.0	0.0 (Examiner A)	1.0 (Examiner B)
UE005	1.8	—	1.0 (Examiner A)
UE006	1.5	—	0.0 (Examiner A)
UE007	4.2	1.0 (Examiner A)	1.0 (Examiner B)
UE008	5.8	1.0 (Examiner B)	—
UE009	1.5	0.0 (Examiner B)	0.0 (Examiner A)
UE010	2.0	1.0 (Examiner B)	0.0 (Examiner A)
UE011	4.3	0.0 (Examiner B)	1.0 (Examiner A)

実験 1 回目の結果からモデル化した POD

$$\begin{aligned}
 POD(a) &= 1 - \exp[-(a - \beta)] \\
 \beta &= 1.455, \quad se_{\beta} = 0.4043 \\
 RSS &= 1.406
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

実験 2 回目の結果からモデル化した POD

$$\begin{aligned}
 POD(a) &= 1 - \exp[-(a - \beta)] \\
 \beta &= 1.160, \quad se_{\beta} = 0.2680 \\
 RSS &= 1.144
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3.3 累積破損確率の結果

Fig.4 に検査間隔 4, 5, 8 及び 10 年で解析した運転期間 40 年目の累積損傷確率を示す。

ここで、Fig.4 の横軸は検査間隔、縦軸は累積破損確率 (対数スケール) である。丸は実験 1 回目、三角は実験 2 回目での結果の散布図である。実線は三角の、破線は丸の線形補間である。

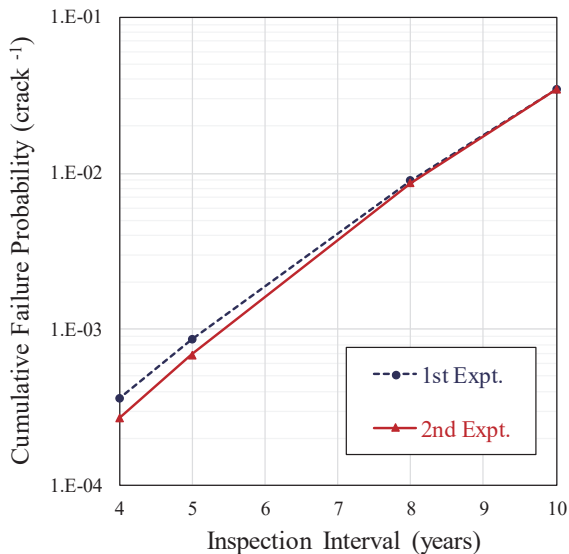


Fig.4 PFM results of the 1st and the 2nd experiment

4. 考察

4.1 UT 試験員の力量向上に関する評価

式(2)及び(3)でモデル化した POD を評価するために、実験 1 回目及び 2 回目でのブラインド試験及びモデル化した POD をグラフで可視化した結果を Fig.5 に示す。

ここで、Fig.5 の横軸は欠陥高さ、縦軸は POD である。丸は実験 1 回目、三角は実験 2 回目でのブラインド試験結果の散布図である。破線は実験 1 回目、実線は実験 2 回目、太線は β 、細線は $\beta \pm se_{\beta}$ でモデル化した POD の散布図平滑線である。

Fig.5 は、 β でモデル化した POD において、実験 2 回目 (太実線) の $POD(a)$ が、実験 1 回目 (太破線) より左側に位置する結果を示し、 $\beta \pm se_{\beta}$ でモデル化した POD において、実験 2 回目 (細実線) の $POD(a)$ が、実験 1 回目 (細破線) より幅の狭い結果であった。これは、実験 2 回目は、小さい欠陥高さでも検出できる確率が高いこと、また、検出のバラツキが小さいことを示唆するものである。

また、Fig.4 は、検査間隔が 4 及び 5 年について、実験 2 回目 (三角) の累積破損確率が、実験 1 回目 (丸) より低い結果を示した。

よって、モデル化した POD 及び累積破損確率は、UT 試験員の力量向上の評価に有効であることが実証された。

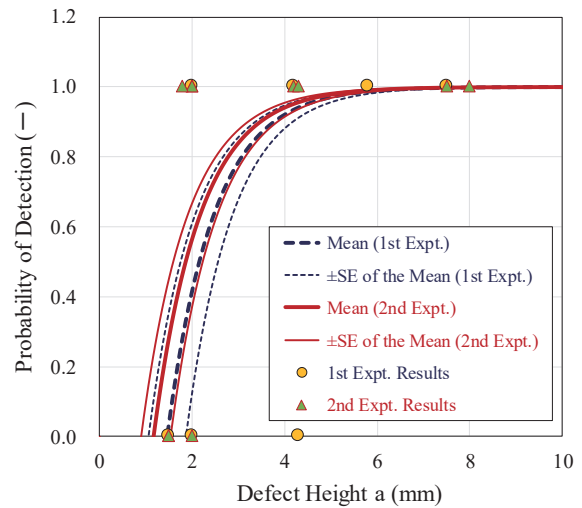


Fig.5 Relationship between the 1st and the 2nd POD curve

4.2 力量向上が配管破損リスクに及ぼす影響

モデル化した POD の不確かさとして、95%信頼限界を考慮した累積破損確率を算出し、UT 試験員の力量向上が配管破損リスクに及ぼす影響の評価を行った。

β の 95%信頼限界は、プロファイル尤度法[11]により算出した。モデル化した POD は、 β 及び 95%上側信頼限界

をPFMの入力条件とした。UTの検査間隔は5年とした。

Fig.6に、検査間隔5年による運転期間40年間での解析結果を示す。ここで、Fig.6の横軸は運転期間、縦軸は累積破損確率（対数スケール）である。丸は実験1回目、三角は実験2回目での散布図である。実線は三角の、破線は丸の線形補間である。また、太線は β の、細線は95%上側信頼限界の補間直線である。

Fig.6は、運転期間10年目以降の累積破損確率で、 β 及び95%上側信頼限界ともに、実験1回目（丸）の累積破損確率が実験2回目（三角）を上回る結果を示した。この結果は、実験2回目での試験員ABの力量向上により、配管破損リスクが低減したことを示すものである。

よって、本稿の実験及び解析により、UT試験員の力量向上に伴い、PFMに基づく配管破損リスクは低減することが実証された。

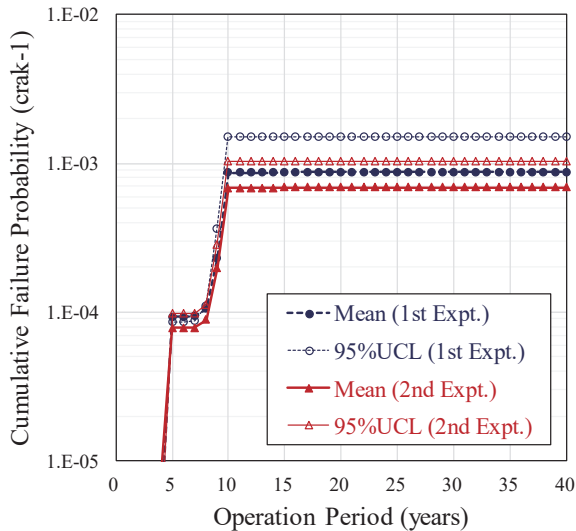


Fig.6 Relationship between the 1st and the 2nd cumulative failure probability with ISI in every 5 years

5. 結論

無資格のUT試験員2名に対して、SCCを有する配管溶接部へのブラインド試験を11週間間隔で2回実施した。また、その結果を使用し、指数関数でモデル化したPODを算出した。さらに、PFMにより配管の累積破損確率を算出した。これらの実験から得られた結論を以下に示す。

- ・モデル化したPOD及び累積破損確率は、UT試験員の力量向上の評価に有効である。
- ・UT試験員の力量向上に伴い、PFMに基づく配管破損リスクは低減する。

参考文献

[1] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “平成16年度

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の確認に関するもの）[総括版]”, 05 基材報-0001(2/2), 2005.

- [2] 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, Vol.77, No.782, 2011, pp.240-255.
- [3] 東海林一, 水谷義弘, 葭田貴子, “発電プラントの健全性確保に求められる欠陥検出確率の検討（損傷確率に及ぼす欠陥検出確率の影響評価）”, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.845, 2017, pp.1-9.
- [4] M. Kojima, H. Takahashi and H. Kikura, “Evaluation of Capabilities on Ultrasonic Testing Examiners Using Probability of Defect Detection and Cumulative Failure Probability”, Japan Society of Maintenance, E-Journal of Advanced Maintenance, 2019年5月7日投稿, 第16回学術講演会開催時点査読中.
- [5] 社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会, “軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程”, JEAC 4207-2008.
- [6] H. W. Bargmann, “Pressure Vessel Integrity in the Presence of Defects: The Probabilistic Prediction in Spite of Scarce Data”, Nuclear Engineering Design 93, 1986, pp. 289-294.
- [7] M. Arakawa, K. Narumi, H. Machida and K. Onizawa, “Benchmark Analysis on the Failure Probability Assessment of Piping with Stress Corrosion Cracks”, The ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2011-57498, 2011.
- [8] 一般社団法人 日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会, “発電用原子力設備規格 維持規格（2008年版）”, JSME S NA1-2008.
- [9] 原子力保安院, “原子炉再循環系配管に係わる健全性評価方法について（案）”, 資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子力発電設備の健全性小委員会（第10回）配布資料, 資料10-7, 2004.
- [10] 永井正貴, 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—”, 電力中央研究所報告, Q16007, 2017.
- [11] 芳賀敏郎, “医薬品開発のための統計解析 第3部 非線形モデル 改訂版”, サイエンティスト社, 2016.