



SCC 深さ測定 PD 試験受験者の技量評価

Evaluation of SCC Depth Sizing Candidate and Performance

電力中央研究所	笹原 利彦	Toshihiko SASAHARA	Member
電力中央研究所	直本 保	Tamotsu JIKIMOTO	Member
電力中央研究所	秀 耕一郎	Koichiro HIDE	Member
東京工業大学	井上 裕嗣	Hirotsugu INOUE	Non-Member

The Japanese PD qualification examination for SCC through wall depth sizing started in March, 2006, and was operated by PD Center of Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI). As of March 31, 2009, 23 examination courses have finished and 27 out of 38 candidates passed the examination. The total number of test including retest was 63. Increase in the examination pass rate of retest personnel indicates improvements in the depth sizing technique through PD qualification examination and the sizing techniques are quickly absorbed by young generation. The probability analysis of candidate verified that the averaged depth sizing error of qualified personnel is within 1mm and estimated realistic standard deviation of sizing error at field is 2.2mm.

Keywords: Ultrasonic Examination, Flaw Depth Sizing, Performance Demonstration, Qualification, SCC

1. はじめに

国内における Performance Demonstration (PD) は 2005 年 5 月に日本非破壊検査協会規格 NDIS 0603:2005 「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」の制定によりその端緒が開かれた。

(財)電力中央研究所は国内原子力発電設備の安全性向上に貢献のため、NDIS 0603:2005 附属書「軽水型原子力発電所用機器に対する PD 資格試験」に従ったステンレス配管突合せ溶接部に発生するき裂の高さ(深さ)測定の PD 資格試験(以下 PD 試験)実施のため 2005 年 11 月に材料科学研究所に PD センターを設立[1]、2006 年 3 月より試験を開始した[2][3]。以来、2009 年 3 月末までの 3 年間に 7 期 23 回の試験を実施、38 名が受験し 27 名が合格した。また、再受験を合わせた延受験者は 63 名であった。

本論文は今後の超音波探傷(以下 UT)によるき裂深さ測定技術の向上に資するため、PD 試験実施の効果、PD 試験受験者の技量、PD 試験合格者のき裂深さ測定精度および結果の信頼性について統計的評価を行ったものである。なお、NDIS 0603 はき裂として応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)を要求しており、PD 試験は実質 SCC の深さ測定試験となっている。

連絡先: 笹原利彦、〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1、電力中央研究所 材料科学研究所 PD センター、電話: 046-856-2121、e-mail:sasahara@criepi.denken.or.jp

2. PD 試験の実施方法

PD 試験は以下の方法で実施している。

- (1) 手順書と試験装置の準備
受験者が手順書と試験装置を準備する。
- (2) 試験体
ステンレス配管突合せ溶接部に SCC を付与した以下の 3 種の試験体を使用する。
大口径管: 公称外径 600A、公称肉厚 35mm
中口径管: 公称外径 350A、公称肉厚 25mm
小口径管: 公称外径 150A、公称肉厚 10mm
試験体には深さ 15mm 以上の SCC および先端が溶接金属内にある SCC がそれぞれ 1 個以上含まれる。
- (3) SCC 深さ測定

管径の異なる 3 種の試験体を組み合わせた 10 個の SCC 深さを測定する。10 個のうち 6 個の深さは Table 1 の分布とし残りの深さは任意に振り分けられる。

受験者は試験体表面に指示された線より左右 25mm の範囲内で SCC の最大深さを測定する。

Table 1 Distribution of SCC depth

Depth h (% wall thickness)	Minimum number
$0 < h \leq 30\%$	2
$30 < h \leq 60\%$	2
$60 < h < 100\%$	2

(4) 試験時間

試験時間は準備を含めて 8 時間/日×5 日間である。試験体は 1 体ずつ提供され、1 試験体に許される試験時間は最長 1 日である。また、1 試験体について日を跨いでの探傷は許されない。

(5) 採点と合否基準

受験者は各試験体の深さ測定終了の都度、測定結果を提出する。合否基準を以下に示す。

- ① 測定値の RMSE (Root Mean Square Error) が 3.2mm を超えない。RMSE の算出は次式による。

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (1)$$

m_i : SCC 深さの測定値
 t_i : SCC 深さの真とする値
 n : 試験体数

- ② 測定値は真とする値に対して 4.4mm を超えて下回らない (-4.4mm 制限)。

3. PD 試験の実施結果

3.1 受験者の傾向

試験時期、受験者数および試験結果を新規受験者と再受験者に分けてまとめたものを Table 2 に示す。傾向として第 1 期は新規受験者の合格率が高いのに対し第 2 期以降は新規受験者の合格率が低下、その一方で再受験者の合格率が向上したことが読み取れる。

第 2 期以降の新規受験者合格率の減少は、き裂深さ測定を実務とする第一線級の検査技術者のほとんどが第 1 期で受験を終了したためと推定できる。また、第 2 期以降に再受験者の合格率が向上したことを考え合わせると第 1 期で再受験者合格率低い理由は、初回受験から再受験までが 2006 年 3 月から 6 月までの間と短く、PD 認証制度が発足して間もなくであったため、所属組織の教育システムが十分整備できていなかったためと考えられる。

第 2 期では再受験者 4 名が全て合格し、その RMSE が 1.55mm と他の期に比べて抜きん出て良いのは再受験者が第 1 期試験では不合格となったものの実力を備えた技術者であったためと考えられる。

Table 2 Examination result of each term

ID	Term	First trial			Retest		
		exam.	pass	RMSE*	exam.	pass	RMSE*
1st	2006/03-06	18	8	3.38	7	1	3.62
2nd	2006/07-09	8	1	6.13	4	4	1.55
3rd	2007/02-03	3	1	3.63	3	2	2.14
4th	2007/07-08	4	0	4.63	4	3	2.16
5th	2008/01-03	3	1	4.01	2	1	2.79
6th	2008/06-08	1	0	-	3	2	2.03
7th	2009/01-02	1	1	-	2	2	1.86

* averaged RMSE of candidate

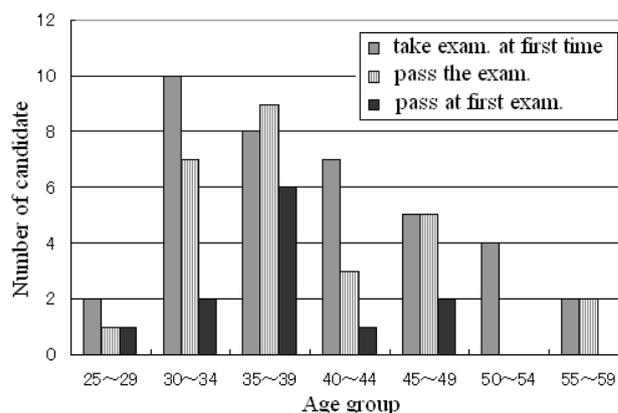


Fig.1 Candidates age when he took/pass the exam.

第 2 期以降の新規受験者は、所属組織が技量ありとし PD 試験に対応した SCC 深さ測定の教育を受けたはずであるが、実践的な経験が少ないためか不合格が多い。これらの受験者の半数以上は PD 試験の経験をもとに研鑽し再受験で合格している。この傾向は第 2 期以降の再受験者の RMSE 値の改善と合格率の上昇から読み取ることができる。また、これらの技術者が PD 試験の中で実践的な経験を積んだことは、PD 試験中に測定精度の向上が認められること、および試験後のアンケートで「PD 試験を受けて勉強になった」との感想が複数得られたことから推察可能である。

Fig.1 に PD 受験者の初回受験時年齢と合格時年齢を示す。また、初回受験で合格した受験者の年齢も併せて示す。初回受験で合格した受験者の分布から、PD 試験を開始した時点で既に実践的な技能を有していたのは 30 歳後半のグループと言える。また、再受験合格者では 30 歳前半の技術者の増加が最も多い。50 歳代には初回受験合格者はいない。これは SCC の深さ測定にはこれまでの探傷とは異なる技術と経験の習得が必要なことを示している。

3.2 探傷に要する時間

Fig.2 に受験者の試験体 1 体あたりの平均探傷時間と RMSE の関係を可否と共に示す。探傷時間は 150A 試験体でやや短い傾向はあるが 350A 試験体と 600A 試験体では大きな差はなかったため、管径に係わらず試験体毎の探傷時間の算術平均を平均探傷時間とした。

第 1 期試験において、探傷時間が短いグループで RMSE は合格基準を満たすが -4.4mm 制限を超えたため不合格となった受験者が 3 名発生した。この過小評価は試験初日に発生したため、PD センターは学術講演会等で慎重な探傷を行うよう注意を促した[2]。その後探傷時間が 2 時間を切る受験者で -4.4mm 制限を超えた例は発生していない。現場経験が豊かで技量の優れた技術者は探傷の手際が良く判断も速いが、それでもなお慎重な探傷が必要であり、実プラントで検査作業を管理、監督する側も同様の慎重さが求められる。

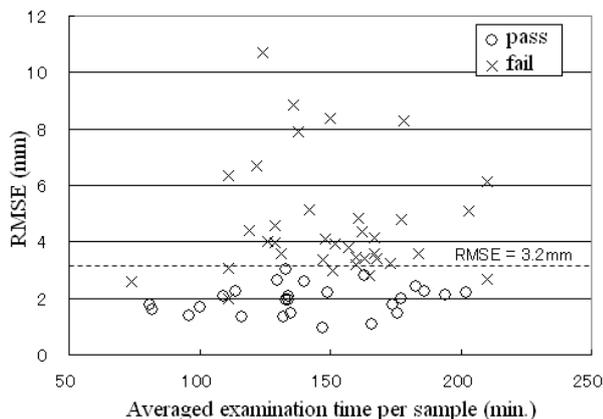


Fig.2 RMSE vs. averaged examination time per sample

3.3 探傷技術

PD 試験に使用された手順書は、再循環系配管のき裂深さ測定実証試験[4]で開発された、従来の横波斜角法に溶接金属中の超音波透過性の優れた縦波斜角法、SCC 深さを大まかに判別するモード変換波法および探傷結果を平面、断面図等で表示するフェーズドアレイ法を加えたいわゆる改良 UT 法[5]が主流であった。Fig.3 は PD 試験に使用された UT 手法を示す。手動 UT 法は横波、縦波、モード変換波を使用するが合格者は 3 名である。手動 UT にフェーズドアレイを加えた改良 UT 法の合格者が多いことはフェーズドアレイ法が効果的なことを示している。しかしながらフェーズドアレイ主体の合格者が少ないのは手動 UT で収集している情報をフェーズドアレイ主体の手法が完全には補完できていないことを示している。

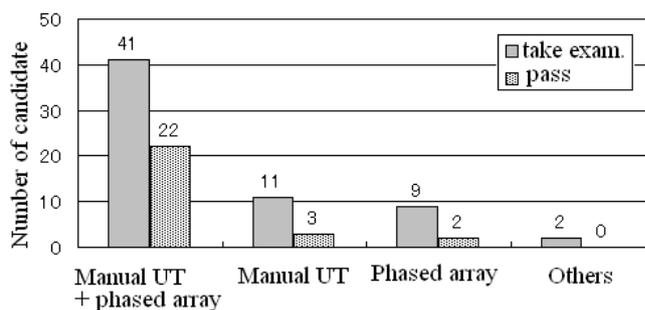


Fig.3 UT procedures applied in PD examination

4. PD 試験結果の解析

4.1 合格者と不合格者の比較

PD 試験不合格者は SCC 先端エコーの判別に問題があることは以前に報告した[6]。Fig. 4 は 600A 試験体での SCC 深さ測定誤差の標準偏差 (S) を合格者と不合格者に分けて示している。(S) は式 (2) により算出した。なお、板厚 10% 毎の標準偏差はその範囲に含まれる試験体の測定誤差の標準偏差を算術平均している。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - t_i)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

x_i : 当該 SCC 深さの測定値

t_i : 当該 SCC 深さの真とする値

n : 当該 SCC を測定した受験者数

Fig.4 は合格者の標準偏差が SCC 深さに係わらずほぼ一定であるのに対し、不合格者の場合は板厚の 20% から 60% までの範囲の標準偏差が大きく、深さ測定値のばらつきが大きいことを示している。

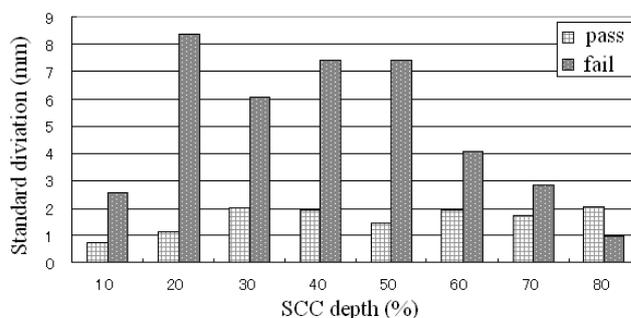


Fig.4 SCC depth vs. sizing error of candidates

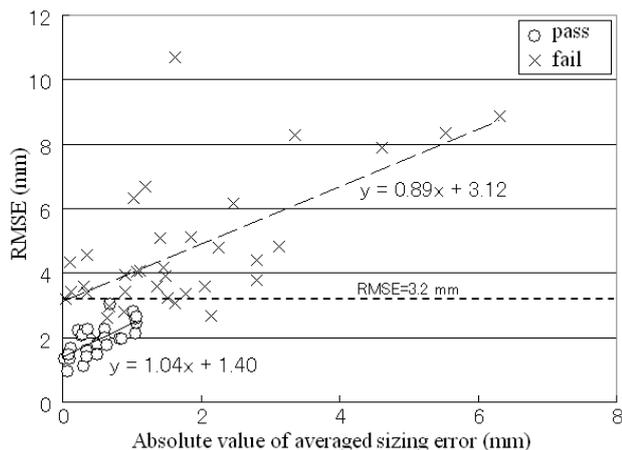


Fig.5 RMSE vs. sizing error of candidates

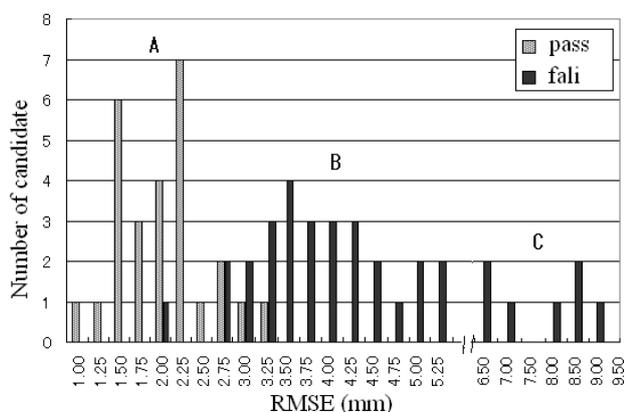


Fig.6 Distribution of sizing skill of candidates

Fig.5 は平均誤差の絶対値と RMSE の関係をプロットしたものである。合格者の平均誤差と RMSE は相関係数 0.69 で直線関係が認められる。RMSE と平均誤差 (\bar{x}) 間には式 (3) の関係があり、この直線性は合格者の測定誤差の標準偏差 (S) が 1.4mm から 2.5mm の狭い範囲内にあるために成立している。回帰直線の切片 1.40mm は測定誤差から人的要因を除いた現状技術における誤差の標準偏差を示すと考えられる。不合格者の場合は相関係数が 0.64 ではあるものの RMSE のばらつきが大きく、相関関係は明確でない。

$$RMSE = \sqrt{\bar{x}^2 + \frac{n-1}{n} S^2} \quad (3)$$

n : データ数

Fig.6 は受験者の技量レベルの分布を確認するために RMSE を横軸とした受験者数の分布を示している。

Fig.5 および Fig.6 から受験者の技量レベルは一つのピークを持つ連続的分布にはならず階層的に分布し、以下の 3 グループに大別できることが判明した。

グループ A :

RMSE が約 3mm 以内で平均誤差が ±1mm 以内のグループで SCC の深さによらずその先端を特定できる技量を有している。また、RMSE が 3.2mm 未満で 4.4mm 制限を超えた技術者は、技量はグループ A に属するものの注意不足で不合格になった者と、平均誤差が 1.5mm を上回り次に示すグループ B に属する者に分類できる。

グループ B :

RMSE が 3mm から 6mm 範囲の技量を持つグループで板厚の中間部にある SCC 先端を確実に識別する技量が不足しており、複数の試験体で SCC 先端を誤認識している。

グループ C :

勘違いと思える非常に大きな 1 個のミスあるいは複数個の大きなミスの結果 RMSE が 6mm を超えている。手順書と装置を組み合わせた深さ測定技術の習得が不十分、あるいは新たな手順を開発したがその検証が不十分なまま PD 試験に臨んだ可能性が高い。

4.2 SCC 深さ測定値の信頼性

PD 試験で集積した 630 個のデータより、合格者に期待できる SCC 深さ測定精度を算出した。Table 3 は全受験者、合格者、不合格者の測定誤差の平均値および式 (2) で算出した標準偏差を示す。参考として ASME の合否基準 $RMSE < 3.2mm$ (0.125") および欧州の実証試験などで用いられる基準 $RMSE < 3.0mm$ を適用した場合の合格者についても算出した。

SCC 深さ測定値の信頼性を検討するにあたり測定誤差の分布について確認した。UT によるき裂深さサイジングにおける測定誤差は古川等によりおおむね正規分布であると報告されている[7]が PD 試験においても正規分布となっているかを合格者について正規確率紙を用いて確認した結果を Fig. 7 に示す。図では標準偏差の 2 倍に相当する ±4mm の範囲でプロットがほぼ直線となりおおむね正規分布であると考えられる。

Table 3 Statistic numbers of candidate performance

Candidate group	Sample	Averaged error (mm)	Standard div. (mm)
All	630	0.62	4.01
Pass	270	0.17	2.00
Fail	360	0.95	5.00
$RMSE < 3.2mm$	340	-0.05	2.20
$RMSE < 3.0mm$	310	-0.03	2.08

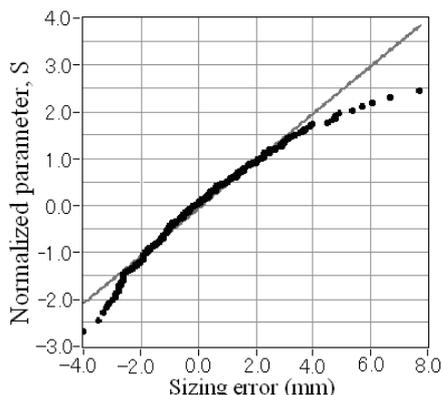


Fig.7 Distribution check by normal probability paper

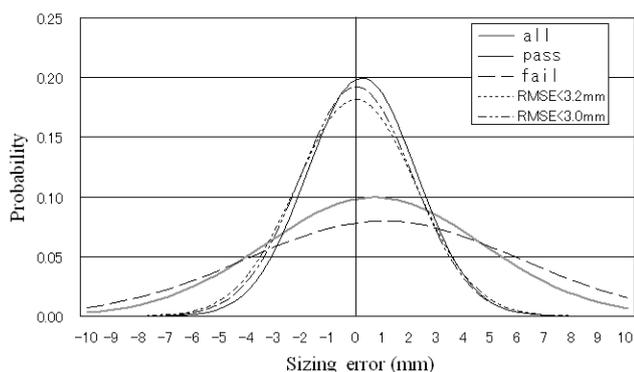


Fig.8 Probability density of sizing error

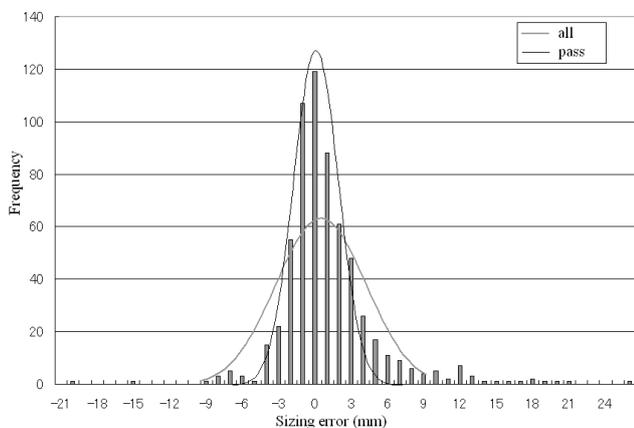


Fig.9 Distribution of sizing error (All)

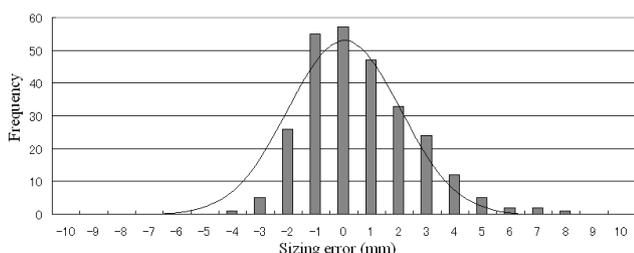


Fig.10 Distribution of sizing error (Pass)

平均値を (μ) 標準偏差を (σ) とする正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の確率密度 $f(x)$ は式 (4) により求められる。この式により Table 3 に示した各グループの測定誤差の確率密度を求めた結果を Fig. 8 に示す。なお、Table 3 の標準偏差は母分散の不偏推定値より求めているためこれを母標準偏差 (σ) として計算した。

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

Fig.8 において我国と欧米基準による合格者の誤差の確率を比較した場合、わずかではあるが我国の基準が安全側に設定されていることが確認できた。

Fig.9 は全受験者の測定誤差の度数分布に全受験者および合格者の正規分布をあてはめたものである。度数分布のクラス分けは 1mm 単位とし、横軸の測定誤差“1”は 0 以上 1 未満の数を示している。

Fig.9 の度数分布は測定誤差 0mm を挟んでおおむね左右対称であるが、標準偏差より算出した正規分布より尖っており、誤差の小さな範囲は合格者の分布に近く、誤差の大きな範囲は全受験者の分布よりも裾野が広がった形となっている。

Fig.10 は合格者の測定誤差の度数分布を正規分布 $N(0.17, 2.00^2)$ に当てはめたものである。また、RMSE<3.2mm の受験者の測定誤差の度数分布を正規分布 $N(-0.06, 2.15^2)$ に当てはめたものを Fig.11 に示す。

Fig.10 および Fig.11 とともに測定誤差の分布は、平均誤差 0mm 付近を挟んでほぼ対称であるが、上側がなだらかな曲線であるのに対し下側は -3mm 以下が挟られた形となっている。この歪みは -4.4mm 制限による心理的な影響と推察できる。

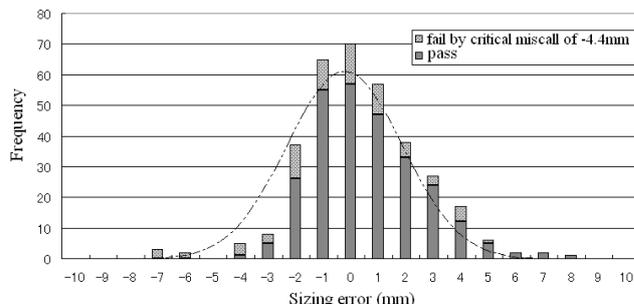


Fig.11 Distribution of sizing error (RMSE<3.2mm)

PD 試験合格者が現場で SCC 深さ測定を行なう場合は PD 試験と異なり -4.4mm 制限を考慮する必要が無いため、実際の測定誤差の分布はより正規分布に近くと予想できる。したがって、PD 試験合格者の測定値が -4.4mm 制限を超える確率 $P(x)$ は、合格者の正規分布 $N(0.17, 2.00^2)$ と式 (5) に示す下側累積確率 $P(x)$ で計算でき、 $P(x)=0.011$ (1.1%) を求めることができる。

$$P(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (5)$$

また、ASME Code Section XI, Appendix VIII と同じく RMSE が 3.2mm (0.125 インチ) 未満を合格とする場合に測定誤差が -4.4mm 制限を超える確率は正規分布 $N(-0.05, 2.20^2)$ より 2.4% と推定できる。

これまで行った PD 試験の結果、RMSE が 3.2mm 未満のグループで測定値が -4.4mm 制限を超えたデータは 7 個ありグループの測定数 340 個の約 2.1% となっている。この確率は正規分布より算出した確率 2.4% とほぼ一致する。

RMSE が 3.2mm 未満だが測定値が -4.4mm 制限を超えた技術者は注意不足が不合格を招いた可能性が大きいことは先に述べた。この注意不足が合格者全てに起こり得ると仮定すると PD 試験合格者の信頼度を推定するには -4.4mm 制限を超えたために不合格となった者を加えた RMSE < 3.2mm グループの標準偏差 $\sigma=2.2$ mm で評価するのが安全側と考えられる。

5. まとめ

ステンレス鋼配管突合せ溶接部の SCC 深さ測定に関する PD 試験で得られたデータをもとにこれまでの実績を評価した結果、以下の知見が得られた。

(1) PD 試験実施の効果

第 2 期以降の再受験者の合格率上昇から、PD 試験実施により SCC 深さ測定技術の開発と習得が促進され、合格基準に達する技術者数が増加した。

(2) PD 受験者の技量

PD 試験合格者は SCC の深さに関わらず正しい深さ測定が可能であるのに対し、不合格者は肉厚の 20% から 60% 深さの SCC の測定誤差が大きい。SCC 深さ測定技術の習得には様々な深さの SCC 試験体を使って練習することが有効と考えられる。

(3) SCC 深さ測定精度

PD 試験合格者の測定誤差の平均値は 0.17mm で、高い精度で測定を行っている。また、測定誤差は標準偏差 2.0mm の正規分布にほぼ一致する。

(4) SCC 深さ測定値の信頼性

PD 試験合格者の測定誤差の分布は -4.4mm 制限の影響と思われる歪が見られる。このため合格者の現実的な誤差確率密度は RMSE < 3.2mm グループの標準偏差 2.2mm の正規分布に従うと考えられる。この場合に SCC 深さ測定値が -4.4mm 制限を超える確率は 2.4% である。

参考文献

- [1] 笹原利彦、“SCC 高さサイジングの PD 資格試験実施方法”、日本非破壊検査協会 超音波分科会 第 13 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、2006、pp.91-96.
- [2] 笹原利彦、“PD 資格試験の実施経過とその方向”、日本保全学会第 3 回学術講演会要旨集、2006、pp. 259-262.
- [3] 笹原利彦、直本保、秀耕一郎、神戸弘巳、“PD 資格試験の実施状況 ～試験開始から 1 年を振り返って”、平成 19 年度火力原子力発電大会論文集、2007、pp. 79-83.
- [4] 総合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評価等に関する小委員会 (第 8 回) 資料 8-2 「(財) 発電設備技術検査協会 “超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験について”」、2003.
- [5] 経済産業省 原子力安全・保安院、“原子炉再循環系配管等の検査への改良超音波探傷試験の適用について”、2004.
- [6] 笹原利彦、直本保、“PD 試験とその実績について”、日本非破壊検査協会平成 19 年度春季大会講演概要集、2007、pp. 31-34.
- [7] 古川敬、古村一郎、米山弘志、山口篤憲、“超音波探傷試験によるき裂深さサイジングにおける教育訓練目標の指標について”、保全学 Vol. 4、No. 3、2005、pp. 50-55.

(平成 21 年 5 月 11 日)