

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

財団法人	発電設備技術検査協会	溶接・非破壊検査技術センター	古川	敬	Takashi FURUKAWA
財団法人	発電設備技術検査協会	溶接・非破壊検査技術センター	古村	一郎	Ichiro KOMURA
財団法人	発電設備技術検査協会	溶接・非破壊検査技術センター	米山	弘志	Hiroshi YONEYAMA
財団法人	発電設備技術検査協会	溶接・非破壊検査技術センター	山口	篤憲	Atsunori YAMAGUCHI

1. はじめに

オーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接部のき裂深さサイジング技量に関して、(社)日本非破壊検査協会規格NDIS0603「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」附属書(規定)「軽水型原子力発電所用機器に対するPD資格試験」^[1](以下、NDIS0603と記す)が制定され、国内でもき裂深さサイジングの技量の指標(測定誤差の判定基準)が示された。一方で、発電用原子力設備の低炭素ステンレス鋼管における健全性評価においては、現時点ではUTで測定したき裂深さに4.4mmを加算する補正をしており^[2]、オーステナイト系ステンレス鋼管のき裂深さ測定において、健全性評価上確保すべき誤差は4.4mm以内と考えられる。ここで、NDIS0603の判定基準が、健全性評価のために求められる水準を満足しているかどうかを把握することは、UTによるき裂深さ測定技術の信頼性を確保するためだけでなく、UT技術者の技量向上の目標を定めるためにも重要なことである。

そこで本報では、UT技術者の技量向上を図る上で目標を示す方法を検討する目的で、NDIS0603の判定基準がオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性のために求められる水準に達しているかを評価した。具体的には「ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂の深さを測定したときに、誤差が4.4mmを超える確率」を計算し、健全性評価のために求められる水準に達しているかどうかを調査した。そして、UT技術者の技量向上の動機付けとなる様に、「ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂の深さを測定したときに、誤差が4.4mmを超える確率」を教育訓練の目標として示す方法についての検討を行った。

2. 検討方法

検討に当たり、まずUTによるき裂深さサイジング誤差がどのような分布を示すのかを調査した。次に、誤差の分布が正規性を有することを確認した上で、統計的な手法によりNDIS0603の判定基準が健全性評価のために求められる水準に達しているかを調査した。ここでは、ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂深さを測定したときに、誤差が4.4mmを超える確率を計算した。これはPDの試験に合格した上でき裂深さを測定するという過程を考慮し、次に示す手順で計算した。まず誤差の平均値と標準偏差をパラメータとして、ある統計的な誤差を有する集団がき裂深さを測定した時に、誤差が4.4mmを超える確率(α)を計算した。また、その集団がPDを受験した時に合格する確率(P)も計算し、ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂深さを測定したときに、誤差が4.4mmを超える確率として、 α とPの積($\alpha \times P$)を用いて健全性評価のための水準に達しているか調査した。

ここで α の計算においては、ある誤差平均(μ)と標準偏差(σ)を有する正規分布($N(\mu, \sigma)$)から、式(1)に従い $-\infty$ から4.4までの積分として算出した。

$$\alpha = \int_{-\infty}^{4.4} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (1)$$

また、合格率Pは、ある誤差平均(μ)と標準偏差(σ)を有する正規分布($N(\mu, \sigma)$)から、ランダムに10個の数値を250通り抽出し、250通りの中からPD判定基準に照らし合わせて合格/不合格を判定して合格率Pとした。

3. 検討結果

3-1) 正規性の検討

超音波探傷試験によるき裂深さサイジング誤差の分布については、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の報告書^[3]の中で正規分布となることが確認されている。この報告書のデータは十分な経験と技量を有する技術者が測定した結果であり、き裂深さサイジングの経験等が少ない技術者の測定誤差がどのような分布をするのかは確認されていない。そこで、経験の少ない技術者の深さ測定誤差であっても、分布が正規性を有するかどうかを調査した。この調査では、(財)発電設備技術検査協会が実施している教育訓練^[4]において、教育訓練の成果の確認として実施しているブラインド(き裂深さを開示しない方法)によるき裂深さ測定の結果を用いた。データ処理にはSAS社JMP5.1Jを用いて、正規分位点(normal quantile)プロット^[5]とShapiro-WilkのW検定^[6]により正規性の確認を行った。図-1に代表的な2例の結果について、誤差のヒストグラム、正規分位点プロット及びShapiro-WilkのW検定による適合度検定結果を示す。図中の正規分位点プロットとは、横軸に誤差の目盛りを等間隔にとり、縦軸には累積相対度数(右側の軸)を示したもので、正規確率紙と同様の表示方法である。図-1(a)はNDIS0603の判定基準では不合格となる結果であり、ヒストグラムから誤差が4.4mmを超えていることがわかる。図-1(b)はNDIS0603の判定基準では合格となる結果であり、4.4mmを超えた誤差は無く、図中には示していないが誤差のRMSも3.2mm以内である。

正規分布へ適合しているかどうかは、正規分位点プロットが直線となることとShapiro-WilkのW検定におけるp値が有意水準よりも大きい値を示すかで判断できる^[7]。図-1(a)及び(b)に示す様に正規分位点プロットは、ほぼ直線となっている。またp値は、それぞれ0.1934と0.1380であり有意水準0.05で検定すると、双方の結果ともに0.05よりも大きく、「正規分布ではない」という帰無仮説が棄却された。この結果は、正規分布でなくはないことを意味しており、すなわちおおむね正規分布をしていると考えられる。

3-2) 判定基準の評価及びUT技量向上の目標

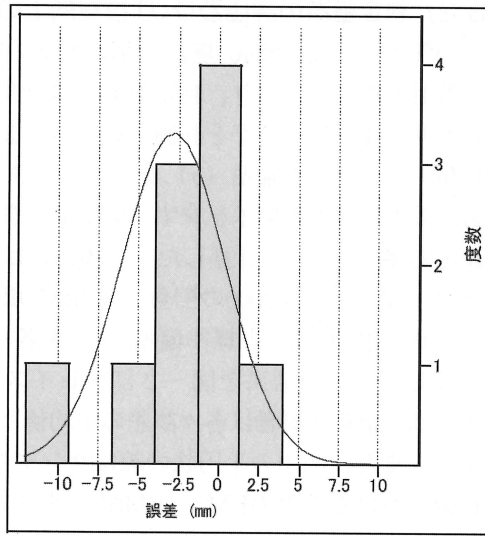
(1) PDシステムが無い場合の測定水準の推定

統計的な手法により、判定基準が健全性評価のための水準に達しているかを評価するため、まず誤差の平均値(μ)と標準偏差(σ)をパラメータとして、その誤差平均と標準偏差を有する集団が、誤差4.4mmを超える確率(α)を計算した。具体的には、マイクロソフト社エクセル2000の関数(NORMDIST)を用いて、誤差平均(μ)と標準偏差(σ)を各々変えて α を計算した。その結果を図-2にグレイスケールで示す。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差である。また、図中の半円状の線はサンプル数(n)が10個における誤差のRMS(RMSE)を式(2)より計算したものであり、各半円状の線に示した数値は誤差のRMSである。誤差平均がマイナスかつ標準偏差が大きくなるほど、 α は大きくなり、誤差のRMSが3.2mm以下の範囲であっても α は最大で15%であった。

$$RMSE = \sqrt{\mu^2 + \frac{n-1}{n} \sigma^2} \quad (2)$$

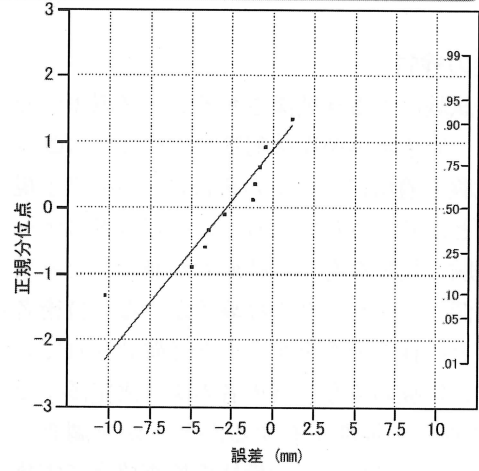
(2) PD合格率の推定

次に、誤差平均(μ)と標準偏差(σ)を有する正規分布($N(\mu, \sigma)$)から、ランダムに10個の数値を250通り抽出し、NDIS0603の判定基準(誤差が4.4mmを超えて下回らない、かつ、誤差のRMSが3.2mm以下)に基づき合格率(P)を推定した。具体的には、ある誤差平均(μ_1)と標準偏差(σ_1)を有する正規分布($N(\mu_1, \sigma_1)$)から10個の乱数を抽出し、これをUTの測定誤差と見なした。そして、この10個の数値について判定基準に基づき合格/不合格を判定した。この判定を250通り行い、250通りの中から合格と判定した数を算出して、ある誤差平均(μ_1)と標準偏差(σ_1)における合格率(P_1)とした。表-1には、例として誤差平均が-2.1mm、誤差の標準偏差を2.2mmと設定した時の計算結果の抜粋を示す。マイクロソフト社エクセル2000の分析ツールを用いて10個の乱数を250通り抽出したもののうち、例として1から5通りと250通り目の数値についてNDIS0603の判定基準に基づき合格/不合格を判定した結果を示す。この設定では250通りのうち48通りが合格と判定され、この誤差平均と標準偏差では合格率が0.19と計算された。



正規のあてはめ

分位点プロット

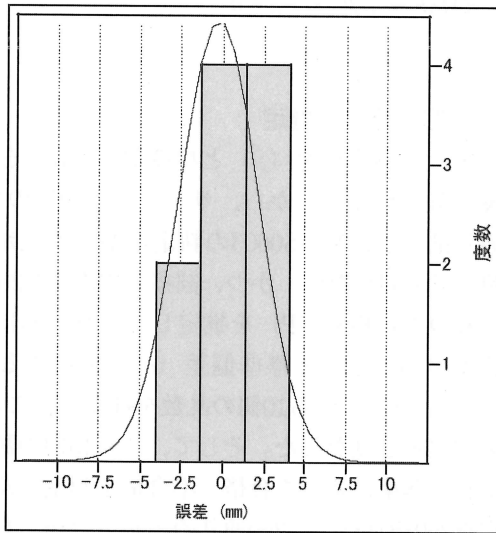


適合度検定

Shapiro-WilkのW検定

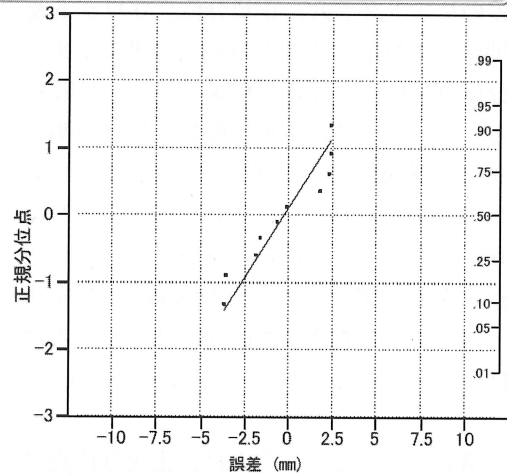
W p値(Prob<W)
0.895095 0.1934

(a) 事例1 (NDISO603の判定基準で不合格) での正規分布の適合度検定結果



正規のあてはめ

分位点プロット



適合度検定

Shapiro-WilkのW検定

W p値(Prob<W)
0.882119 0.1380

(b) 事例2 (NDISO603の判定基準で合格) での正規分布の適合度検定結果

図-1 深さサイジング誤差の正規性の調査結果

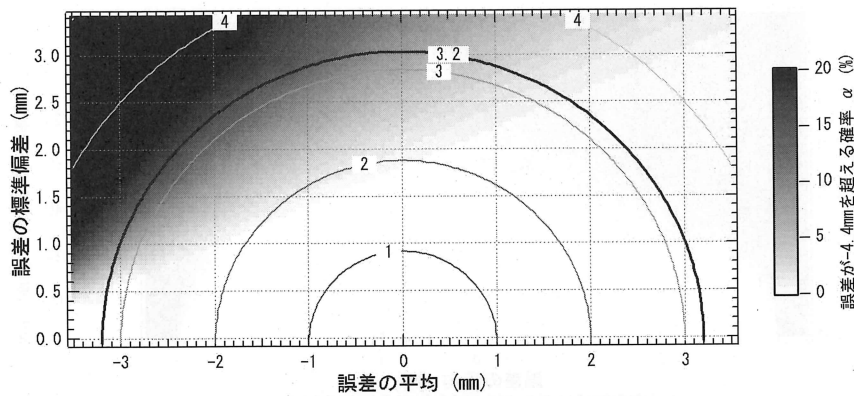


図-2 サンプル数10個での誤差のRMSと誤差が4.4mmを超える確率
(□内の数値はサンプル数10個での誤差のRMSを示す)

表-1 乱数を用いた計算の例

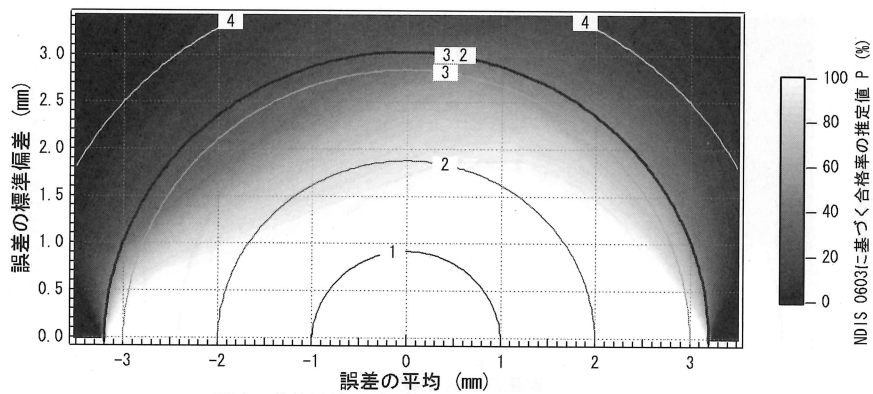
		250通り(1~250)					
		1	2	3	4	5	250
誤差平均(μ , 設定値):	-2.10(mm)	-0.97	-4.30	-6.21	1.66	-5.34	-2.09
標準偏差(σ , 設定値):	2.20(mm)	-0.58	-3.27	-4.13	-3.33	-2.82	-2.52
N:	250	-1.56	-3.61	3.13	-1.41	-0.29	-3.12
		-2.52	-1.73	-1.58	-3.73	-2.53	-1.23
		-4.30	-1.48	-2.82	-4.17	-0.92	-2.28
		-0.75	2.05	-0.68	-0.82	-4.58	-0.96
		-1.48	-2.44	-2.14	-1.94	0.82	1.24
		-4.18	-5.41	-3.27	-4.08	-3.01	-0.92
		0.19	-1.84	0.40	-0.89	-4.73	-2.16
		-0.31	-3.77	-4.25	-2.74	0.19	-0.99
割合	度数						
RMSE \leq 3.2	0.47	118					
4.4mmしきい値	0.20	49					
合格率(P_c)	0.19	48					
10個のサンプル数							
平均値	-1.646	-2.581	-2.154	-2.145	-2.321	-1.502	
標準偏差	1.557	2.050	2.654	1.842	2.188	1.225	
RMSE	2.325	3.367	3.531	2.893	3.272	1.981	
最小値	-4.300	-5.407	-6.206	-4.169	-5.341	-3.123	
合否	○	×	×	○	×	○	

図-3は、誤差平均 (μ) と標準偏差 (σ) を各々変えて計算した合格率 (P) の分布を示す。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差であり、合格率 (P) をグレイスケールで示す。図-3 (a)はNDIS0603の判定基準に基づき推定した結果であり、図-3 (b)は比較のためにASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI Appendix VIII Supplement 2^[8] (以下、ASMEと記す)の判定基準 (誤差のRMSが32mmを超えない) に基づき合格率を推定した結果である。図中の半円状の線は、サンプル数10個での誤差のRMSを計算したものでRMSの数値とともに示す。ASMEの判定基準で推定した結果では、誤差平均0を中心にほぼ左右対称になっているのに対し、NDIS0603の判定基準での結果では左右対称ではなく誤差平均がマイナスとなる領域で合格率の推定値が下がっている。これはNDIS0603の判定基準の「誤差が44mmを超えて下回ってはならない」という項目による

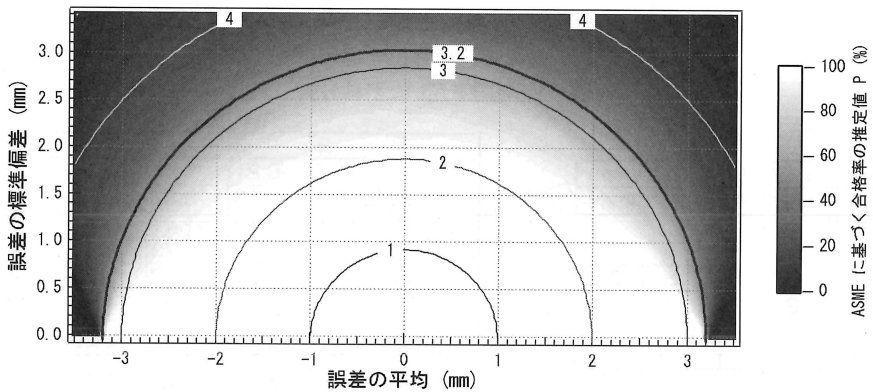
ものであり、この領域は、図-2に示した α が5%から15%程度の範囲にほぼ対応している。

(3)PD判定基準の評価

判定基準が健全性評価のために求められる測定水準に達しているかを評価した。図-4は、「ある統計的な誤差を持つ集団がPDに合格した上でSCCを測定して誤差が44mmを超える確率 ($\alpha \times P$)」を推定した結果である。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差であり、算出した $\alpha \times P$ を色合いと等高線で示す。また、図中には、サンプル数10における誤差のRMSが32mmとなる線も合わせて点線で示す。図-4より、 $\alpha \times P$ の最大値は3.75%であった。図-4の計算においては、乱数を発生させる種 (ランダムシード) を1と設定して計算したものである。乱数の発生条件を変えるため、ランダムシードを2及び3と設定して同様に計算を行ったが、

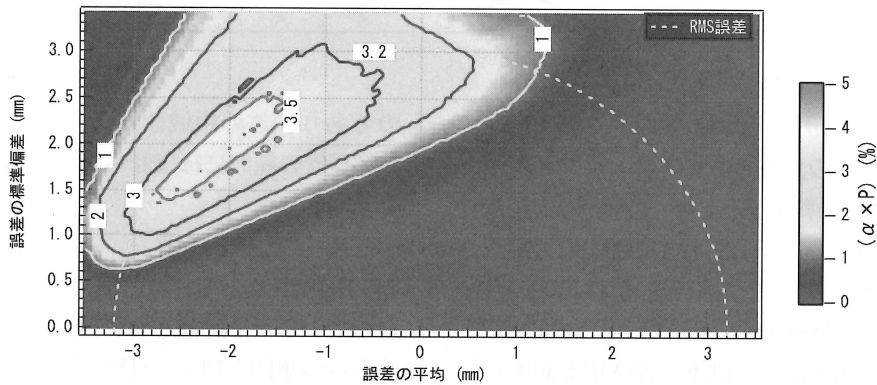


(a) NDIS0603の判定基準に基づき推定した合格率



(b) ASMEの判定基準に基づき推定した合格率

図-3 乱数を用いて推定したPDの合格率



(点線上の□内の数値はサンプル数10個での誤差のRMSを、実線上の□内の数値は $\alpha \times P$ を示す)

図-4 ある誤差を有する集団がPDに合格した上でSCCを測定したときに誤差4.4mmを超える確率の推定値

いずれの結果においても、 $\alpha \times P$ は最大でも5%未満であった。これらの計算結果よりNDIS0603の判定基準は、95%の信頼度でオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性評価のために求められる水準に達しているものと考えることができ、UT技術者の技量向上を図る上での

目標として適切な指標であると考えられる。

(4) UT技量向上の目標設定

図-5は、UT技術者の技量向上における目標設定を具体化したイメージ図である。UT技術者の現状の

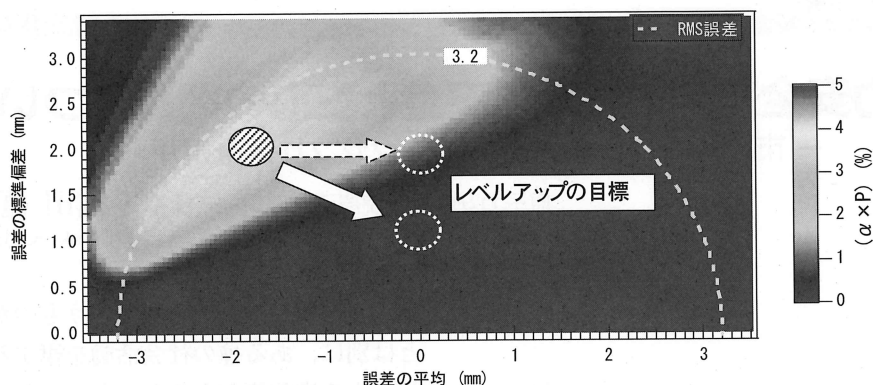


図-5 き裂深さサイジング技量向上目標のイメージ図

誤差に対して、まず誤差平均を0に近づけ、次の目標として、さらに標準偏差を小さくするという目標設定の概念である。この時に、き裂深さサイジング精度やPD合格率の推定値を単に示すだけでなく、UTによるき裂深さ測定値が健全性評価に用いられることを見据えて、「ある誤差を有する集団がPDに合格してSCCを測定した時に誤差が4.4mmを超える確率」を示すことで、UT技術者の技量向上の動機付けや更なるレベルアップに寄与することを期待する。

4. まとめ

UT技術者の技量向上を図る上での目標を示す方法を検討する目的で、NDIS0603の判定基準がオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性評価のために求められる水準に達しているかを評価した。その結果、「ある誤差を有する集団がPDに合格してSCCを測定した時に、誤差が4.4mmを超える確率」は最大でも5%未満であり、95%の信頼度でNDIS0603の判定基準がオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性評価のために求められている水準を満たしていると考えられる。今後、「ある誤差を有する集団がPDに合格してSCCを測定した時に、誤差が4.4mmを超える確率」も教育訓練の目標として示し、き裂深さサイジング技量向上へ活用することを計画する。

参考文献

- [1] (社)日本非破壊検査協会規格“NDIS0603 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”、平成17年5月18日制定（発行：平成17年6月20日）。
- [2] 経済産業省 原子力安全・保安院、“平成16・09・08原院第1号 発電用原子力発電設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について”、平成16年9月22日。
- [3] 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の報告書”、平成16年8月。
- [4] 米山弘志、杉林卓也、山口篤憲、“超音波探傷試験による疲労き裂と応力腐食割れの検出及び深さ測定に関する教育訓練の効果”、平成16年度火力原子力発電大会論文集、2004、pp.311-316。
- [5] SAS社、“JMP統計及びグラフ機能ガイド”、2003、p.43。
- [6] SAS社、“JMP統計及びグラフ機能ガイド”、2003、p.62。
- [7] 新村秀一、“JMP活用 統計とおき勉強法－革新的統計ソフトと手計算で学ぶ統計入門－”、講談社、2004、pp.157-186。
- [8] ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SECTION XI APPENDIX VIII, “PERFORMANCE DEMONSTRATION FOR ULTRASONIC EXAMINATION SYSTEMS”, 2004, pp.297-301。

(平成17年7月21日)