

# 超音波探傷試験によるき裂深さサイジングの信頼性に関する検討

## Reliability of Crack Depth Sizing on Ultrasonic Testing

(財)発電設備技術検査協会 古川 敬 Takashi Furukawa Member  
古村一朗 Ichirou Komura Member  
米山弘志 Hiroshi Yoneyama non Member  
山口篤憲 Atsunori Yamaguchi Member

This paper describes two contents about reliability of crack depth sizing on ultrasonic testing. One is verification with appropriate acceptance criteria of the Japanese Performance Demonstration Code (NDIS 0603 Appendix). Another is investigation about the true crack depth measurement method.

**Keywords:** Ultrasonic testing, Depth sizing, Performance demonstration

### 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」<sup>[1]</sup> (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) が示されるとともに、技量認証 (以下、PD と記す) 制度が運用されている。

超音波探傷試験によるき裂深さサイジング精度の信頼性という観点において、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、及び深さ測定精度を評価する際の真とする深さをどの様に決めるのかを検討することは重要なことである。

NDIS0603 の判定基準に関して、著者らは既報<sup>[2]</sup>において 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のために求められる水準に達しているかを評価した。これは「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、求められている水準に達しているかどうかを調査したものである。

本報では、既報<sup>[2]</sup>と同様の手順で乱数の発生条件を変えた再計算により判定基準の妥当性を再確認した結果を示すとともに、き裂深さ測定精度を評価する際の「真とする深さ」の測定方法を検討した結果を示す。

### 2. 判定基準に関する評価

#### 2-1) 評価方法

NDIS0603 の判定基準が健全性のために求められている水準に達しているかを評価する方法の概要を図 1 に示す。このでは、健全性評価上確保すべき誤差は -4.4mm 以内という前提で評価した。

評価の具体的な手順は、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 ( $\alpha$ ) を計算した。この  $\alpha$  の計算においては、ある誤差平均 ( $\mu$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ ) 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。

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

次に、その統計的な誤差を有する集団が PD 試験に合格する確率 (P) を計算した。合格率 P は、ある誤差平均 ( $\mu$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ ) 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。

連絡先: 古川 敬、〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町 14-1、(財)発電設備技術検査協会、電話: 045-511-2751、e-mail: furukawa-takashi@japeic.or.jp

そして、ある統計的な誤差を有する集団が PD 試験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、 $\alpha$ 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。

## 2-2) 評価結果

この評価では、超音波探傷試験による深さサイジング誤差が正規分布となることを前提とした<sup>[2]</sup>。誤差の平均値( $\mu$ )と標準偏差( $\sigma$ )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 ( $\alpha$ ) を式(1)から計算した。その結果を図 2 にグレイスケールで示す<sup>[2]</sup>。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、 $\alpha$ は大きくなり、誤差の RMS が 3.2mm 以下の範囲であっても  $\alpha$ は最大で 15%であった<sup>[2]</sup>。

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

次に、誤差平均( $\mu$ )と標準偏差( $\sigma$ )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<sup>[2]</sup>。実施した方法は既報<sup>[2]</sup>と同様であるが、乱数発生種を 2 として再度計算して推定した合格率(P)を図 3 に示す。乱数種を 1 として計算した既報<sup>[2]</sup>の結果とほぼ同じであった。

そして PD 制度の導入の効果として、ある統計的な誤差を持つ集団が PD 試験に合格した上でき裂深さを測定した時に、誤差が-4.4mm を超える確率がどの程度になるかを、 $\alpha \times P$  で評価した<sup>[2]</sup>。ここでも計算の手順は既報と同様とし、乱数発生種を 2 として再度計算した結果を図 4 に示す。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差であり、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 3.2mm 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 3.76%であった。この結果も既報と同等であ

った。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測定水準を誤差-4.4mm 以内という前提では、95%の信頼度で NDIS0603 の判定基準は妥当であると考えられる。

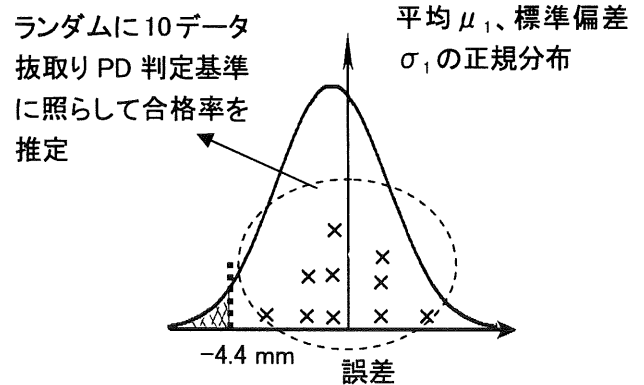


図 1 判定基準の評価方法の概念図

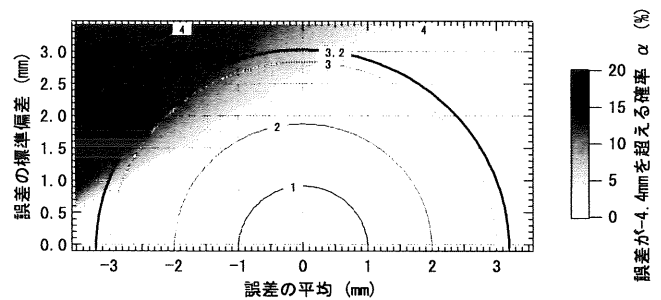


図 2 誤差が-4.4mm を超える確率( $\alpha$ )の計算結果<sup>[2]</sup>

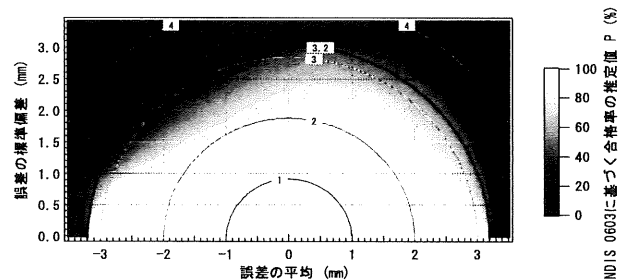


図 3 NDIS0603 に基づく PD 試験合格率の推定値

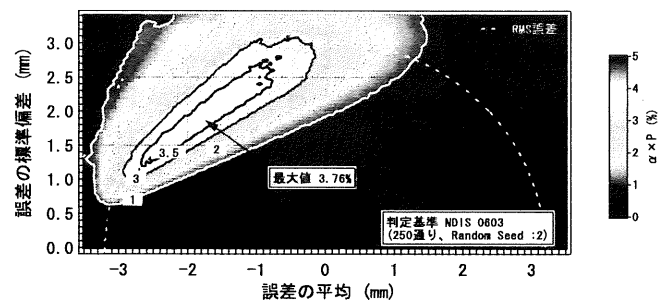


図 4  $\alpha \times P$  の推定値

### 3. 真とする深さ測定に関する検討

#### 3-1) 測定方法の検討

ここでは、オーステナイト系ステンレス鋼管試験体を対象とし、き裂深さ測定精度を評価する際の「真とする深さ」の決め方を検討した結果を示す。まず、測定方法については、基本的には超音波探傷試験による方法を採用したが、試験体は実機配管と違って被爆や姿勢等の制約が無いとため、配管の内外面の両面から、そしてき裂の両側から探傷した。さらに、き裂の開口部を直接観察し開口部と裏波との位置関係や裏波の形を把握した。これは、超音波探傷結果を評価する時の情報になることに加えて、後述する超音波探傷シミュレーション解析において、溶接部の形状や欠陥の位置を入力する時のデータとする。

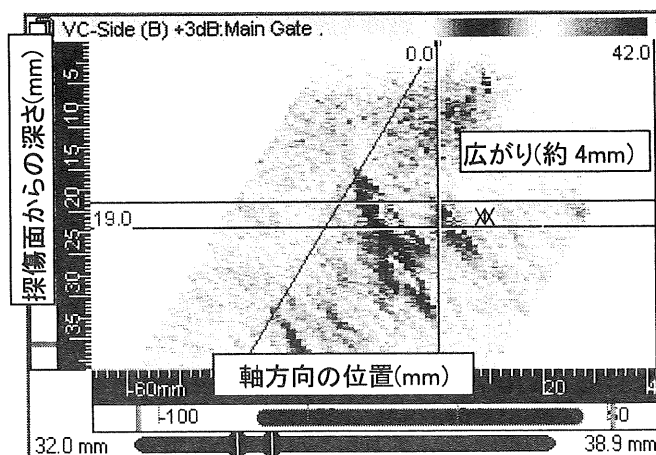
また、き裂深さの把握に繋がるのではないかと考える情報として、例えば、き裂の開口状況を直接観察し、き裂が複雑に分岐しているかどうかをある程度推定することや、PT(浸透探傷試験)の浸透液のにじみ具合などから深さの情報を得た。

き裂深さ測定に適用する超音波探傷試験方法は改良 UT 法とし、具体的には自動探傷法による横波及び縦波斜角端部エコー法やフェーズドアレイ法を適用した。本報で適用した方法は、外面から探傷した横波端部エコー法では公称周波数 2MHz 及び 5MHz で屈折角 45 度、縦波端部エコー法では公称周波数 3MHz 及び 5MHz で屈折角 45 度、そして内面からの探傷では、公称周波数 2MHz のフェーズドアレイ法により屈折角 60 度と 70 度の縦波で探傷した。欠陥深さの予備判定法として用いる 2 次クリーピング波法及びモード変換波法も自動探傷で測定した。次に、これらの測定データから真とする深さを評価する方法及び手順を示す。

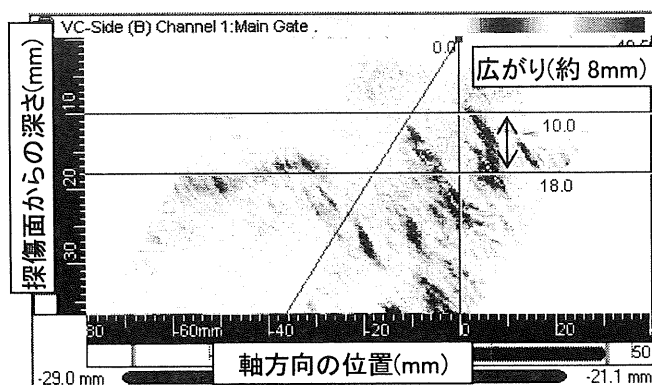
#### 3-2) 深さ評価の方法・手順の検討

欠陥深さの評価に先立ち、深さの予備判定を実施した。欠陥深さの予備判定方法は、2 次クリーピング波法及びモード変換波法によってモード変換波によるエコーの有無から判定する方法に加えて、自動探傷結果を画像表示した時に、画像上の指示の板厚方向への広がり方を把握する方法も用いた。図 5 は縦波斜角法による探傷結果を B スコープ表示した画像上の広がり方から深さを予備判定した例である。

図(a)は板厚 22mm の試験体での探傷結果の例であり、き裂深さは 4mm 程度(開口部及び先端部の深さ位置が各々 22mm、18mm 程度)と予備判定した。図(b)は板厚 18mm の試験体の探傷結果の例であり、き裂深さを 8mm 程度と予備判定しものである。



(a) 画像上の指示の広がり方から予備判定した結果  
浅い(4mm 程度)と判定したき裂



(b) 画像上の指示の広がり方から予備判定した結果  
深い(8mm 程度)と判定したき裂

図 5 超音波探傷画像上の指示の広がり方からき裂深さを予備判定した例

予備判定の結果をもとに、横波/縦波端部エコー法及びフェーズドアレイ法の探傷結果から、各々き裂深さを評価した。探傷結果から深さを評価する際に、超音波探傷シミュレーション解析結果を活用し端部エコーの識別や先端部の特定を行った。シミュレーション解析の入力データは、溶接部の形状や裏波の形、き裂開口部の位置及び予備判定結果に基づく深さ等である。

シミュレーション結果を活用した深さ評価方法を有効に活用した例を図6及び図7に示す。これは板厚20.5mmの試験体の探傷結果であり、図6(a)には横波端部エコー法のBスコープ画像を示す。このき裂では、モード変換波法の結果では振幅は小さいもののモード変換波が出現するあたりのビーム路程にエコーが認められていた。図6(a)中にAと記した矢印のエコーは探傷面から深さ14mmにあり、これが端部エコーと仮定すると、き裂深さは6.5mmと測定されてモード変換波法による予備判定結果と良く対応している。しかし、探傷画像上の広がり方から深さを予備判定した結果は、図6(a)中にBと記した矢印で示す様に4mm程度以下と判定した。縦波斜角法による探傷結果では図6(b)に示す様に探傷面から深さ14mm近辺に端部エコーらしいエコーは無く、画像の広がり方から予備判定した結果は約4mm程度であった。また、内面から水浸法で探傷した結果でも表面不感帯内の浅いき裂と考えられた図6(a)中にAと記した矢印で示したエコーは端部エコーとは考え難く、判断に迷った。

そこで、き裂深さやき裂の傾きを変えてシミュレーション解析を行った。その結果の例として深さ2mmのき裂でのシミュレーション解析結果を図7に示す。図7は自動探傷と同様に、探触子の位置を変えて解析して得られたシミュレーションによる波形をBスコープ画像表示したものである。これは周波数5MHzの横波探触子を模擬した解析結果であり、図6に示した探傷条件と対応するものである。図7中のA,Bで示した矢印部分が各々コーナーエコー及び端部エコーである。図7ではCと記した矢印部分に探傷面からの深さ位置が15mm程度にエコーが確認された。シミュレーション解析結果より伝搬経路を調査した結果、き裂へ当たった横波が反射する際に縦波にモード変換して探触子へ戻った経路と推定された。このシミュレーション解析結果も考慮して図6(a)のAと記した矢印のエコーは端部エコーでは無いと判断し、このき裂は深さを4.5mm(横波)、3.9mm(3MHz縦波)、4.3mm(5MHz縦波)と評価した。

なお、後述する切断調査でき裂深さを実測した結果、深さは3.4mmであり、図6(a)にAと記したエコーはき裂の先端部では無かった。

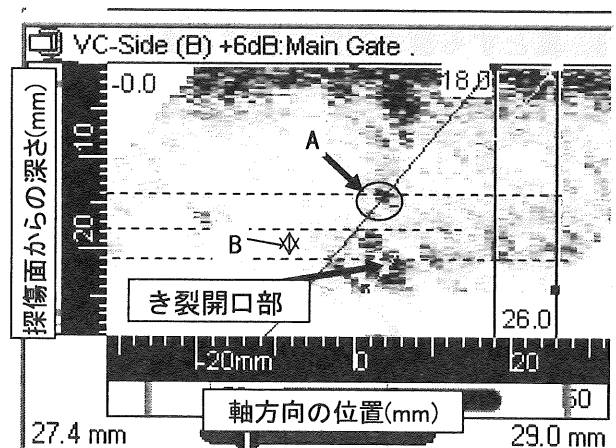


図6(a) 横波斜角法による探傷画像の例

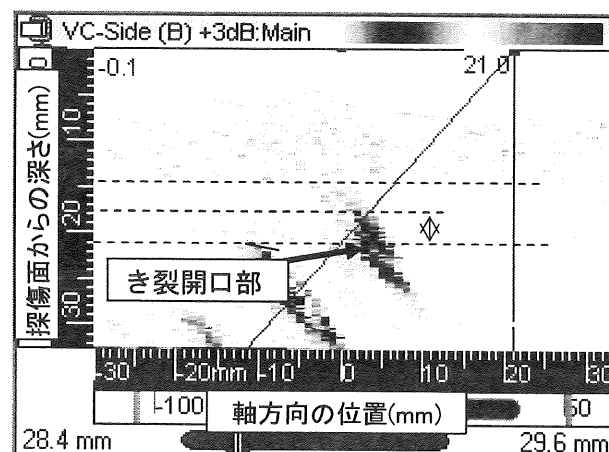


図6(b) 3MHz 縦波斜角法による探傷画像の例

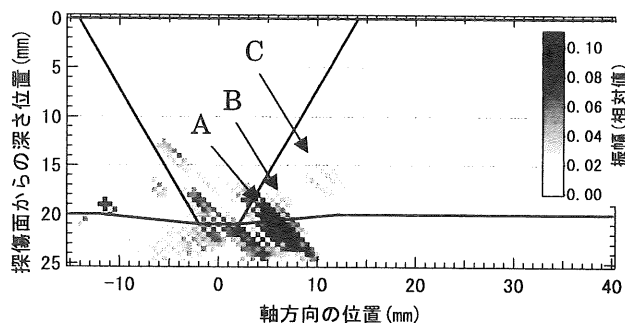


図7 き裂深さ2mmにおけるシミュレーション解析結果  
(横波斜角法の解析)

### 3-3) 真とする深さ評価手順の検証

前項までに検討した内容の妥当性を検証するため、オーステナイト系ステンレス鋼のき裂(SCC)10個について3-1)で示した方法で測定し、3-2)で検討した方法・手順で横波/縦波端部エコー法及びフェーズドアレイ法の手法ごとに深さを評価した。深さの評

価において、き裂の先端部が溶接金属内に入っていると推定したき裂では、横波斜角法では深さを評価しなかったが、適用した手法ごとにき裂深さを評価した。

10個全てのき裂深さを評価した後に、切断調査でき裂深さを実測した結果と比較した。その結果を図8に示す。ここで、深さが約15mmの二つのき裂については、切断調査の結果き裂の先端（き裂深さの半分程度）は、溶接金属内に入っていた。他のき裂の先端部は溶接熱影響部内に存在していた。図8は、一つのき裂に対して複数の手法/条件で測定した結果を全て記載したものであり、極端な過大評価あるいは過小評価は無いことが確認された。

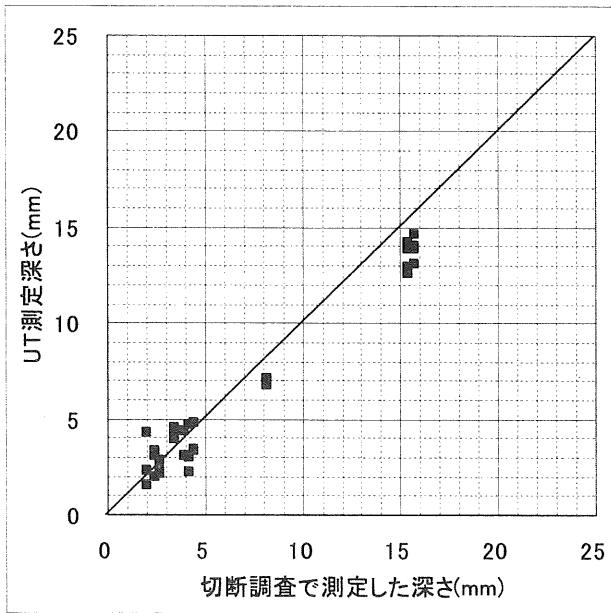
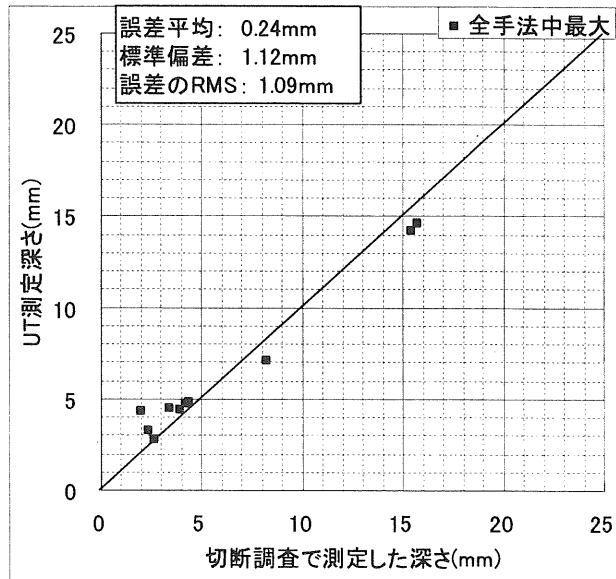


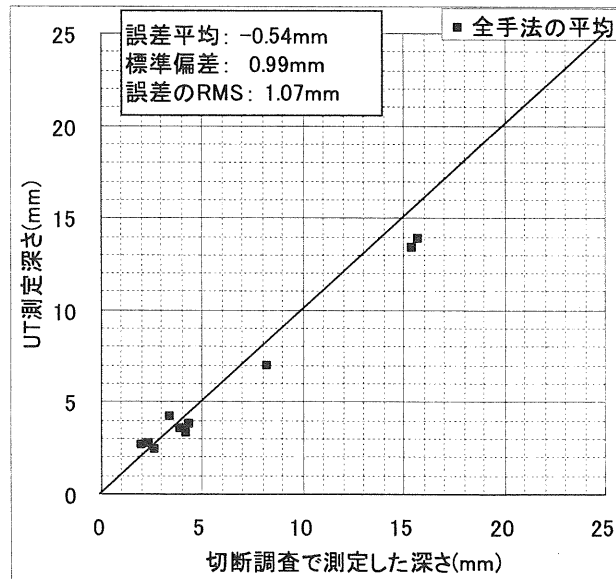
図8 き裂深さ測定結果

最後に、一つのき裂に対して複数の手法/条件で測定した結果から、き裂の深さの代表値を評価する方法を検討した。この方法には、測定値の最大をとる方法、平均値をとる方法、あるいは、き裂深さに応じて例えば浅いき裂であれば横波での測定値を選択し深いき裂であれば縦波の測定値を選択する方法などが考えられる。ここでは、最大値を選択する方法と平均値を選択する方法について、深さ測定精度を比較した。その結果を図9に示す。今回のデータは、一つのき裂に対して個々の手法間での差異が小

さいため、最大値を選択する方法と平均値を選択する方法とでは、同等の測定精度であった。



(a) 適用した複数手法間の最大値を選択



(b) 適用した複数手法間の平均値を選択

図9 き裂深さ代表値の総合判断方法検討結果

### 3-4) 真とする深さ評価方法のまとめ

今回の検討結果を流れ図にしたものを図 10 に示す。き裂開口部や裏波の詳細な調査や、この調査結果に基づくシミュレーション解析を活用した端部エコーの識別支援など、試験体の測定に特有な項目はあるものの、この様な手順を踏まえて測定した「真とする深さ」の測定精度は、誤差の RMS (Root Mean Square ;2 乗平均の平方根) は 1mm 程度であることが確認された。

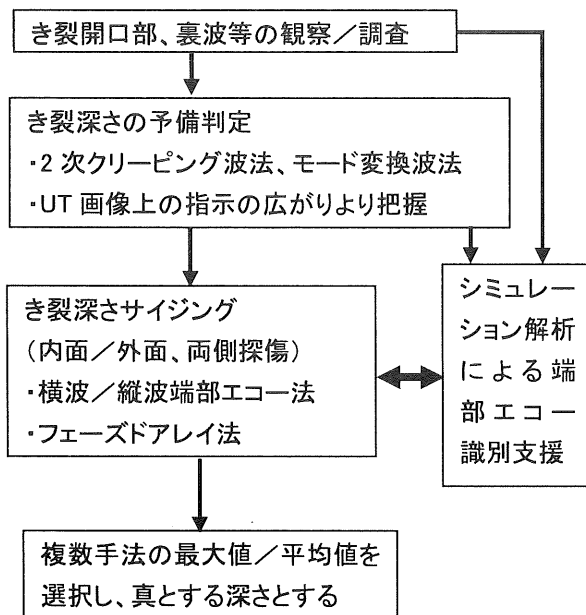


図 10 き裂の真とする深さの決定手順

### 4. まとめ

超音波探傷試験によるき裂深さサイジングの信頼性に関する検討として、PD 判定基準の妥当性を評価した結果及び、き裂深さ測定精度を評価する際に、真とする深さをどの様に決定するかを検討した結果について示した。ともに、今後データの蓄積を継続し、超音波探傷試験によるき裂深さサイジングの信頼性をより向上することが重要であると考えられる。

### 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] 古川敬、古村一朗、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、4-3(2005) pp.50-55