

2018 年 12 月 3 日

国内外の超音波探傷試験技術動向比較

(一財) 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

概要

超音波探傷試験（以下 UT と記す）技術（探傷試験用機器、要領）の変遷および新技術の規格への取り込み（標準化・実用化）、探傷試験技術のレベル（欠陥検出確率）、探傷技術者の教育・訓練、技量認証制度について国内外の状況・動向を比較整理する。

なお、本文中に下線を付けた用語と UT に関する一般的な説明を付録に示す。

1. UT 技術

軽水型原子力発電用機器の供用期間中検査で用いられる UT 方法（特に欠陥検出）は、国内外ともに主にパルス反射法¹が用いられている。パルス反射法の基本的な原理は変わっていないが、探傷試験用機器（超音波探傷器、超音波探触子等）や探傷要領は時代とともに進化している。その変遷を以下に示す。この変遷（進化）も国内外ともにほぼ同様である。

● 探傷試験用機器の変遷

◆ 2000 年前後頃を境に

- 超音波探傷器がアナログからデジタルへ変わり記録性等が向上
 - ✓ 探傷データの処理（探傷結果の画像化や信号処理等）が容易になり、アナログ世代に比べ記録性が向上。
- 探触子の感度及び分解能が向上
 - ✓ 探触子の感度及び分解能が向上したこと等により、縦波斜角法²が普及しオーステナイト系溶接金属部の亀裂（例えば異種金属溶接部のニッケル基合金の応力腐食割れ）の探傷性能が向上。
 - ・ ただし、全ての部位に対して縦波斜角法を適用する必要はなく、超音波の透過性が比較的よいフェライト系鋼の溶接部（クラッド部も含む）やステンレスやニッケル基合金の母材及び溶接熱影響部は従来通り横波斜角法の方が良い（同じ周波数の縦波に比べて横波の波長が短く空間分解能が高いため）。UT の目的に応じて適した仕様の探触子を選定することが重要。
 - ✓ 亀裂深さ（板厚方向の寸法）測定方法の一つである端部エコー法³の測定精度が向上し、深さ測定が研究段階から実用化されてきた。
 - ✓ 一方、JIS G 0587 に基づく鍛鋼品の UT⁴において高分解能の探触子では等価きず直径⁵とエコー高さの関係が従来の探触子の場合と異なることが判明。JIS 改正時に適切な分解能の範囲制限を新たに加わった。
 - ✓ UT の目的に応じ適切な仕様の探触子を選定することが重要。

◆ 2005年～2010年頃から

➤ フェーズドアレイ法⁶が普及

- ✓ 探傷データの画像化が高性能化・高度化し、探傷結果の記録性、識別性がさらに向上。
- ✓ 超音波ビームの方向や集束の条件を電子的に任意に変えることができるため、以前より効率的に複数の UT 条件を適用できるようになる。
 - ・ ただし、フェーズドアレイ法といっても、探傷試験の原理はパルス反射法であり、従来と変わりはない。従来法で超音波ビームが届かない範囲（探傷不可範囲）の探傷はフェーズドアレイ法といえども一般には困難である（探傷可範囲が若干増える可能性は期待できる）。
 - ・ また、フェーズドアレイ法が必ずしも高精度ということでもない。2003年頃に「改良 UT 法」⁷が検討された際に、その深さサイジング性能を確認した確性試験において、フェーズドアレイ法を適用した手法と固定角の斜角法を使用した手法で深さサイジング精度は同程度⁸であった。
- ✓ フェーズドアレイ法が活用されるようになることは望ましいが、従来から使用されてきた UT 方法が時代遅れということではない。UT の目的に応じて適切な手法を選択することが重要である。

2. 規格化（新技術の規格化）

JEAC4207 における新技術の規格化の動向と新技術の例としてフェーズドアレイ法の規格化の状況を国内外で比較した。国内は JEAC および JIS を、海外は米国を例として ASME Boiler and Pressure Vessel Code（以下、ASME と呼ぶ）および ASTM の規定を以下に示す。新技術の規格化については、時期の違いはあるが国内外の差異はほとんど無いと言える。

● 国内

- ◆ JEAC4207 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定
 - 1986年に制定（制定時は JEAG4207）され、最新知見や研究開発の成果を反映して継続的に改正、最新版は 2016年版。最新知見（実用化された最新の UT 技術）を規格に取り込んでいる例として、前述した縦波斜角法の試験要領の追加、及びフェーズドアレイ法によるサイジング要領の追加（2008年版）フェーズドアレイ法による欠陥検出方法の追加（2012年追補版）が挙げられる。

◆ JIS

- 現時点でフェーズドアレイ法に関する規格はない。

● 海外（米国）

◆ ASME

- フェーズドアレイ法は Code Case2235-8（2005年10月27日承認）に追加、同時期に Sec. V にも追加。

◆ ASTM

- フェーズドアレイ法による溶接部の探傷方法（E2491）は 2006 年制定、装置の校正方法（E2700）は 2009 年に制定

3．探傷試験の技術レベル（欠陥検出確率）

原子炉圧力容器溶接部の UT について、欠陥検出確率（POD: Probability of Detection）を指標にして日米の探傷試験の技術レベルを比較する。

● 国内のデータ

- ◆ 国内のデータは、1995 年から 2004 年にかけて行われた国の実証事業（以下 UTS と呼ぶ）の報告書（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に関するもの[総括版] 平成 17 年 4 月 原子力安全基盤機構、以下 UTS 報告書と呼ぶ）を基に考察する。

◆ 実証試験の条件

- UTS では欠陥の有無の情報を与えず無欠陥領域と欠陥領域を混在させて探傷試験を実施。欠陥は一部人工欠陥（スリット）もあるが大部分は人工的に付与した疲労亀裂。大部分の亀裂はクラッド表面に開口、数個の亀裂は母材に亀裂を付与した後に開口部をクラッドで覆いアンダークラッドクラッキングを模擬した。
- UTS では評価不要欠陥寸法の亀裂がどの程度検出可能か、亀裂深さ測定精度がどの程度の水準かを把握することを主目的としており、付与した亀裂の寸法は評価不要欠陥寸法周辺が多い。
- 同一試験体に対して外面探傷は 5～6 チームが、内面探傷は 1 チームが実施。
- 各チームは ISI 経験者で構成しプラントメーカーで教育訓練を実施、使用した探傷機材の基本部分は ISI で使用している機材と同等品。
- UT 方法は維持規格原案（現行の JEAC4207 と同様）で、外面探傷では横波斜角 45° 及び 60°、内面探傷は縦波斜角 70° 送信・50° 受信又は 70°。

◆ 実証試験結果

- 外面探傷
 - ✓ クラッド付フェライト系鋼溶接部（板厚 100mm～250mm）の疲労亀裂付与試験体における亀裂深さと検出率の関係を図 1 に示す。
 - ✓ クラッド内の亀裂の検出率は 0～100%だが、母材に進展した亀裂は進展量が 0.8mm の 1 欠陥（VCF76）を除き検出率は 100%。VCF76 においても 6 チーム中 1 チーム検出。
- 内面探傷
 - ✓ UTS でのクラッド付フェライト系鋼溶接部（板厚 100mm～250mm）の疲労亀裂付与試験体における亀裂深さと検出率の関係を図 2 に示す。
 - ✓ クラッド内のき裂及び母材に進展した亀裂ともに、付与した亀裂はすべて検出。付与した亀裂の最小深さは 3.8mm（その亀裂の長さは 24.9mm）。

- 米国のデータ
 - ◆ 米国のデータは、PNNL で実施された回送試験等の結果をもとにした欠陥検出確率（POD）をモデル化した文献（M.A.Khaleel and F.A.Simonen “A model for predicting vessel failure probabilities including the effects of service inspection and flaw sizing errors” Nuclear Engineering and Design, 200(3), pp.353 -369, (2000)）を基に考察する。
 - ◆ POD モデル
 - この論文では 4 種類の UT 技術レベル（Advance, Very Good, Good Marginal）に分類し、POD モデルを作成している。各々図 3 に POD 曲線を示す。
 - 各 UT 技術レベルについて、文献の中では、Very good は ASME Sec. XI Appendix VIII 合格レベルを十分に超える能力を持つチーム、Good はラウンドロビンの中で良い成績に相当するチームと記述されている。これより PD 合格のレベルは Good ~ Very good と考えられる。米国では PD 試験を合格した手法（要領、装置、要員）で ISI を実施しており、文献の記述をもとに考察すると、米国での ISI の UT 技術レベルは Good ~ Very good と考えられる。
- 日米比較
 - ◆ 図 3 に示した POD 曲線を描いたグラフと、図 1 に示した欠陥検出確率のデータの亀裂のみのデータを重ねて描いた結果を図 4 に示す。以下に示す様に、国内データは Advance と同等以上と言える。
 - 外面探傷のデータは、米国 POD モデルの少なくとも Very good 以上で、Advance の POD モデルよりよい性能と言える。
 - 内面探傷のデータは、付与した亀裂を全て検出しており米国 POD モデルの Advance 以上の性能と言える。
 - ◆ UTS で実証された国内の技術レベルは、米国と同等以上と考えられることから、ISI の UT は丁寧な UT と言える。

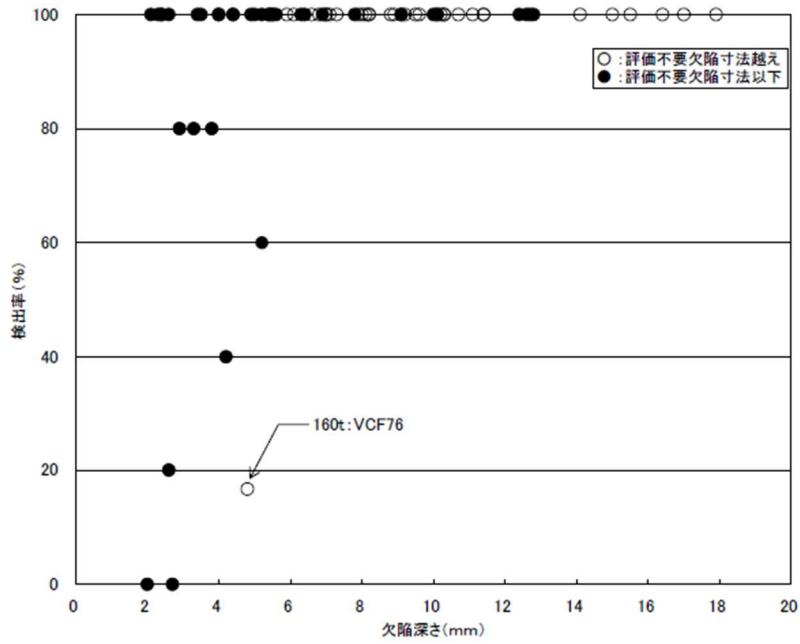


図4.2.3.3(1) 平板炭素鋼クラッド付疲労き裂付与試験体(外面探傷)の欠陥深さと欠陥検出率の関係 (屈折角 $45^\circ + 60^\circ$ 、DAC20%検出レベルの場合)

(a)開口部から亀裂先端までの深さを横軸にして整理

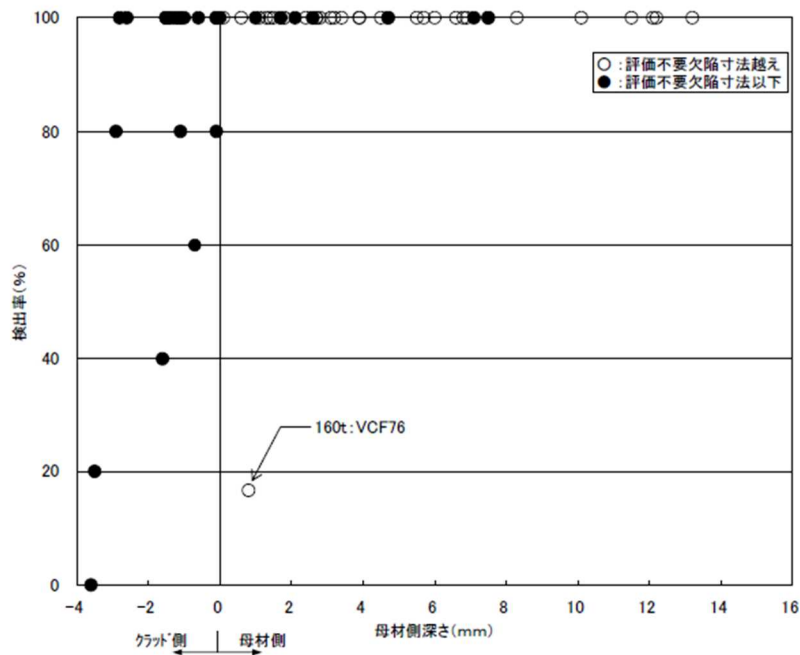
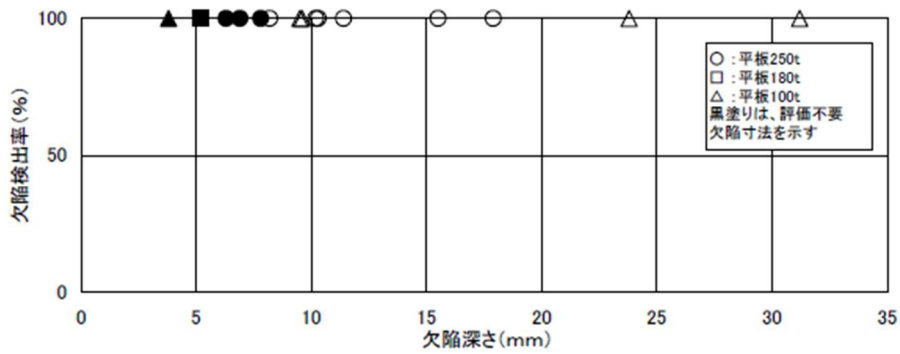


図4.2.3.3(2) 平板炭素鋼クラッド付疲労き裂付与試験体(外面探傷)の母材側深さと欠陥検出率の関係 (屈折角 $45^\circ + 60^\circ$ 、DAC20%検出レベルの場合)

(b)クラッド境界部から先端までの母材側深さを横軸にして整理

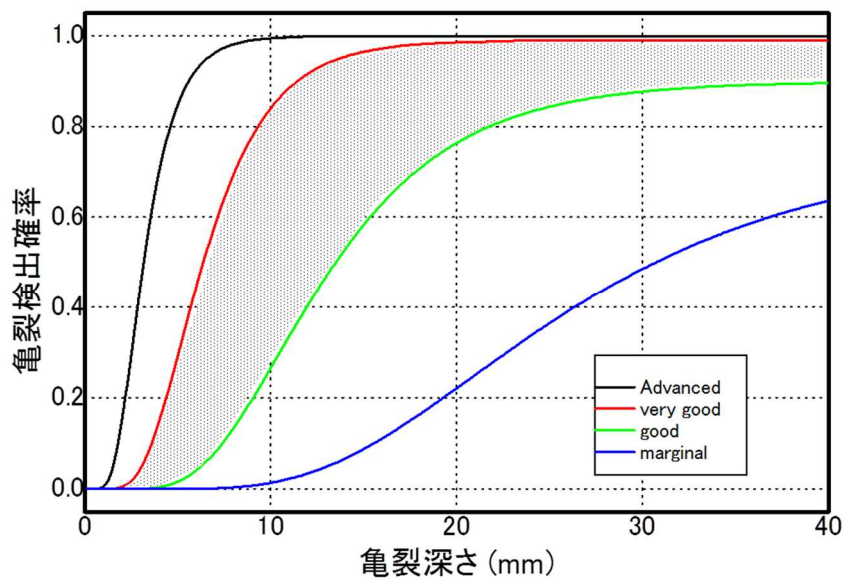
図1 外面探傷における欠陥検出率 (UTS 報告書 p.243 より引用)



(2) 屈折角70-50°

図4.3.3.4(1) 平板炭素鋼クラッド付疲労き裂付与試験体(内面探傷)の欠陥深さと欠陥検出率の関係(DAC20%検出レベルの場合)

図2 内面探傷における欠陥検出率 (UTS 報告書 p.454 より引用)



Marginal: ASME Sec. XI Appendix VIII 合格の可能性が低いチーム

Good: ラウンドロビンの中で良い成績に相当するチーム

Very good: ASME Sec. XI Appendix VIII 合格レベルを十分に超える能力を持つチーム

Advance: ASME Sec. Very good (ASME Sec. XI App. VIII 合格レベルを十分に超える能力)をはるかに超える能力を持つチーム、将来、先進技術や改善された方法を適用する場合の能力

図3 米国 PNNL による POD モデル

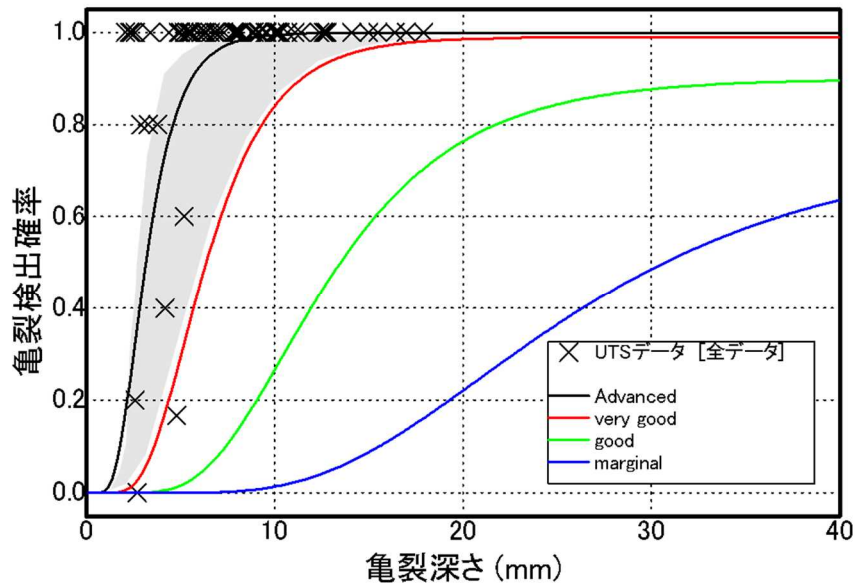


図4 (図3と図1(UTS 外面からの UT)のうち亀裂のみのデータを重ね書き)

4. 探傷試験技術者の教育・訓練、技量認証

ISI の UT に従事する探傷試験技術者の教育・訓練、資格、技量認証について比較する。各項目の国内外の状況を表1に示す。国内外ともに ISI の UT に対しては、基本的な資格に加えて特別な条件を課していることは共通しているが、その特別な条件の課し方には差異がある。主な相違点を以下に記す。

なお、欧州は ENIQ という共通の枠組みが検討されており、装置、要領、要員の認証において、技術確認 (TJ: Technical Justification) と試験体による評価 (Practical Assessment) を適切に組み合わせる方法が推奨されている、試験体による評価では、欠陥情報を開示したオープン試験又は欠陥情報を開示しないブラインド試験が行われている。

- 基本的な資格
 - ◆ 国内は第三者認証⁹である JIS Z 2305 の資格を要求しており、国際的にも共通した技量のレベルと言える。一方、米国は雇用者認証¹⁰である CP-189 を要求しており要員の技量は共通とは言えない。
- ISI の UT 要領と要領の妥当性確認
 - ◆ 国内では標準的な UT 要領として JEAC4207 が規定され、その要領の妥当性は UTS で検証済みである。米国は、ASME Section XI Appendix I に UT 要領が規定されているものの、実質は Section XI Appendix VIII が要求されており具体的には規定されていない。適用する UT 要領は UT 試験技術者が決め、その妥当性は Section XI Appendix VIII の判定基準で担保される。
- ISI の UT に従事する要員の訓練
 - ◆ 国内は JEAC4207 の解説に記載があり、実際はプラントメーカーで独自に教育・訓練を実

施していると考えられるが、規定は無い。また、教育・訓練の項目や内容についても明記されていない。一方、米国は Section XI Appendix VII に規定されている。

- ISI の UT に従事する要員の認定と技量の確認
 - ◆ 国内は UTS の実績があるものの（UTS の実績は前述のとおり米国の POD モデルの Advance と同等以上）その技量が維持されているかどうかの確認方法は無い。米国では Section XI Appendix VII に記述はあるが、最終的には Section XI Appendix VIII の判定基準で担保される。
- ISI の UT に使用する装置・要領・要員の技量とその判定基準
 - ◆ 国内は深さサイジングにおいて NDIS0603 が規定されているものの、検出に関する規定は無い。米国は検出、深さサイジングともに Section XI Appendix VIII で規定されている。

表 1 探傷試験技術者の教育・訓練、資格、技量認証の状況

項目	日本	米国
基本的な資格	第三者認証である JIS Z 2305(ISO 9712 と同等)を要求	雇用者認定である CP-189 を要求
ISI の UT の要領 (要領の妥当性確認)	JEAC 4207 で規定 (UTS で妥当性を検証、UT 装置の妥当性も UTS で検証)	ASME Sec. XI App. I では主要機器に対して App. VIII が要求されているのみで、要領は規定されていない (ASME Sec. XI App. VIII 合格)
ISI の UT に従事する要員の訓練 ISI の UT に従事する要員の認定(訓練効果の確認) ISI の UT に従事する装置・要領・要員の技量認証判定基準	JEAC 4207 解説に記述 UTS で要員の技量を検証 (検証結果の例:図 1、図 2) 深さサイジングは NDIS 0603 で規定 判定基準も NDIS0603 で規定	訓練のメニューと認定方法を ASME Sec. XI App. VII で規定 装置、要領、要員の技量の判定方法を ASME Sec. XI App. VIII で規定 判定基準も ASME Sec. XI App. VIII で規定

(JEAC 4207:2016、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI、発電技検報告書“欠陥測定精度向上に係る検査システムの調査研究報告書”平成 14 年 3 月発行 等を基に整理)

5 . まとめ (所感)

各項目についての比較結果は前述の通り。以下に所感を述べる。

- ✓ 3 . に示したように国内の探傷試験の技術レベルは米国と比べて同等以上の「丁寧な UT」と言えるが、今後、探傷試験技術者の世代交代や労働者人口の減少等を考慮すると、技量の維持・向上が重要であり、教育・訓練内容や方法の標準化、技量の確認方法の整備が必要と考える。

国内の状況に応じた適切な方法や制度を検討・構築し、国内の「丁寧な UT」が維持・向上され、その信頼性がさらに高まることを期待する。

- ✓ 3. では、UTS のデータから POD 曲線の算出を試みたが、外面探傷のデータからは算出できなかったものの内面探傷のデータから POD 曲線の算出はできなかった。今後、リスク情報の活用が進む上で、非破壊試験データの確率・統計処理も重要になると考える。確率・統計処理において UTS のデータでは不足しているデータ（POD 算出に必要なデータやフェーズドアレイ法の POD 曲線等）の取得・拡充が重要かつ必要になると考える。

なお、POD 曲線の取得は、米国 NRC が主催して実施中の非破壊試験に関する国際共同プロジェクト（PIONIC: Program for investigation of non-destructive examination by international collaboration）のテーマの一つになっており、試験データの取得やモデルを用いた解析による取得等が検討されている。

付録

1 パルス反射法：

送信された超音波パルスを反射後、受信する方法。超音波を垂直に入射する方法を垂直法、斜めに入射する方法を斜角法と呼ぶ。

2 縦波斜角法：

試験体に縦波を斜めに伝搬させて探傷するための探触子を縦波斜角探触子と呼び、縦波斜角探触子を用いた斜角法を縦波斜角法と呼ぶ。

3 端部エコー法

きず深さ（板厚方向の寸法）測定方法の一つ、きずの端部で発生する回折波ときずのコーナー部で反射する超音波の伝搬時間差から次式により板厚方向の寸法を算出する方法

$$a = (W_c - W_t) \cos\theta$$

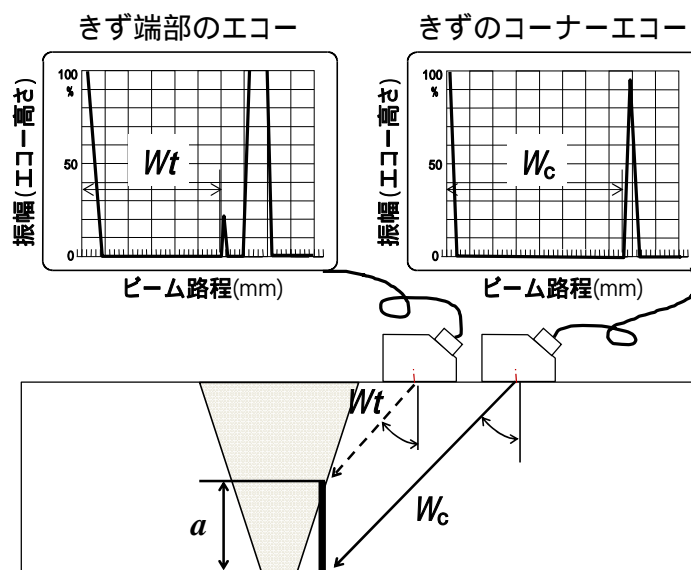


図 端部エコー法の模式図

⁴ JIS G 0587

規格の名称は炭素鋼鍛鋼品及び低合金鋼鍛鋼品の超音波探傷試験方法で、最新版は 2007 年に改正されて

いる。パルス反射法による UT できずの検出及び寸法の評価方法を規定している。

⁵ 等価きず直径

DGS 線図によって計算された円形平面きずの直径 (DGS 線図とは、異なる寸法の円形平面反射源からの反射波の強度と反射源までの距離との関係を示す線図)。

⁶ フェーズドアレイ法

フェーズドアレイ探触子 (複数個の振動子で構成され、異なる位相で独立して動作する探触子) を用いて、電子的な設定で超音波ビームの角度を変えたり集束範囲を変えたりすることができる探傷方法。

⁷ 改良 UT 法

低炭素オーステナイト系ステンレス鋼溶接部において、亀裂先端部が溶接金属に達していても十分な深さサイジング精度が得られるように改良した UT 手法。縦波斜角法、フェーズドアレイ法等の組合せあるいは単独で適用して深さを計測する方法。

⁸ 深さサイジング精度は同程度

・ SUS316L 系材の溶接部に対して実機プラントで発生した SCC の深さ計測したときの測定精度が UT 手法毎に整理されている (下図参照)。縦端とは縦波斜角法、横端とは横波斜角法、PA とはフェーズドアレイ法のことであり、各々深さ計測の原理は端部エコー法である。RMS 誤差の数値がゼロに近いほど精度が良いことを示す。

【参考】 深さ測定精度のまとめ											
切断試験の結果、ひび割れの確認された 13個の深さ測定データを以下にまとめる。											
	A社				B社				C社	D社	E社
	縦端 (A) + 横端 (A)	PA(A) + 横端 (A)	PA(A) _1	PA(A) _2	縦端 (B)	横端 (B)	PA(B) _1	PA(B) _2	縦端 (C) + 横端 (C)	PA (D)	縦端 (E) + 横端 (E)
誤差 平均	-1.0	+0.7	+0.7	+0.7	+2.5	+0.7	+2.2	+1.6	+2.8	-0.1	-0.3
標準 偏差	1.63	1.82	1.82	1.48	1.49	1.83	1.43	1.69	2.56	1.53	1.67
RMS 誤差	1.84	1.88	1.88	1.57	2.87	1.88	2.59	2.28	3.70	1.47	1.63
* F社を除く (mm) 41											

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回委員会資料 「超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度の向上に関する確信試験について」平成 15 年 6 月 4 日 財団法人発電設備技術検査協会, p.41 (2002) より引用

⁹ 第三者認証

組織外の第三者 (通常は外部の機関) によって審査され認証される認証方法。

¹⁰ 雇用者認証

組織内の有資格者によって審査され認証される認証方法。