



超音波探傷技術者の技量訓練への提言

The Proposal to the Ability Training of an Ultrasonic Examination Personnel

(株)NDI リサーチ 笹原利彦

Toshihiko SASAHARA Member

In our country's ISI, the ultrasonic examination has been stored remarkable success in detection of the SCC in a stainless steel piping weld. This result owes to the training in an inspection company and experienced personnel. However, considering latest reduction of an examination opportunity of SCC in an operating plant by the implementation of measures and the change of personnel's generation, it is required to rebuild the ability training system of examination personnel. This paper reviews the qualification system in the US and Europe and proposes the structure of the Japanese system for the ability improvement of an ultrasonic examination personnel. The conclusion of this paper is that it is more rational to strengthen training using realistic specimen rather than implementation of Performance Demonstration as a qualification system of Japan.

Keywords: In-service Inspection, Ultrasonic Examination, Piping, SCC, Qualification, Training, Performance Demonstration

1. 緒言

軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 (ISI) の超音波探傷試験 (UT) は、製造時に健全性が確認された部位に新たに発生するき裂の早期検出を目的とするため、検査技術者 (以下、検査員) には高い技量に加え小さなき裂を見落とさない丹念さが求められている。このため、ISI を行う UT 検査員には一般的な検査員資格に加えて各国が独自の要求を定めている場合が多い。わが国では日本電気協会規程 JEAC 4207 「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」で、UT 結果の評価技術者には認定機関のレベル 2 以上の資格に加えて ISI での探傷経験を求めている。このようにして、わが国では原子力発電プラントのステンレス鋼配管溶接部の応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) の検出では、1980 年代後半以降は ISI の UT 対象継手で SCC が原因で漏洩に至った事例は発生していないなど、良好な実績を重ねてきた。この成果は、電力と検査会社が協力して熟練技術者をプラント専任者として特定のプラントや地区に定着させ、検査業務の管理や若手検査員の指導にあたらせるなどの努力に負うところが大きい。

しかしながら、近年の劣化防止対策の効果による損傷発生事例の減少やプラント長期停止による探傷作業の減少による若手検査員への OJT 機会の減少に加えて、SCC 探傷を経験した熟練検査員の退役による世代交代を考慮すると、検査員の技量を「ISI での探傷経験」ではなく、

より明確な形で規定すると共にそれを担保できる仕組みの構築が必要となっている。

本論文は上述の考えに基づき、UT の信頼性維持及び向上に係る国内外の取り組みを俯瞰しながら国内に適した技量確保の仕組みを提案する。なお、ISI では検査員が手で探触子を走査しながら超音波探傷器に表示される波形を観察する手動 UT と、探触子を機械的に走査して探傷データを採取した後にデータを解析できる自動 UT が使用されているが、配管溶接部の SCC 探傷では接近性と検査箇所数の多さの両面から主に手動 UT が使用されている。この手動 UT では探傷から記録採取までの作業が一人の検査員の判断に委ねられるために、検査員個人の技量が探傷結果に大きく影響する。この点自動 UT では、探傷データを複数の技術者が解析することが可能であるため手動 UT とは異なる技量が求められる。このため、本論文で提案する技量確保の仕組みは、手動 UT と自動 UT に分けて記述する。

2. UT 信頼性向上への取り組み

2.1 UT 信頼性実証試験開始の経緯

ISI における UT は、1970 年に米国機械学会の ISI 規格である ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI (以下、ASME Section XI) の発行を契機とするが、ISI が開始された直後より、探傷結果が検査員や検査会社により食い違う問題が多発し、UT の信頼性に疑問が投げかけられた[1]。この疑問に答えるために UT 技術の信頼性実証試験が国内外で開始されている。以下に国内外の主な UT 信頼性実証試験の成果とその後の対応を述べる。

連絡先: 笹原利彦、〒251-0032 神奈川県藤沢市片瀬 5 丁目 14-37、株式会社 NDI リサーチ、
E-mail: ndi-research@mbr.nifty.com

2.2 国内における取り組み

国内では UT の信頼性に関して大掛かりな二つの実証試験が実施された。このうち、1980年から1986年にかけて実施された「供用期間中検査実証試験」では、実機模擬試験体を使用した実証が行われ、欠陥検出性、検出精度及び検査結果の再現性などについての知見を得ると共に国内で使用されている検査手法の有効性が実証された[2]。1995年から2004年にかけて実施された「超音波探傷試験による欠陥検出性及びサイジング精度に関する確証試験」(UTS : Ultrasonic Test & Evaluation for Maintenance Standards) では、より多くの SCC や疲労き裂付与試験体を使用して欠陥検出性及びき裂深さ測定精度が確認された[3]。国内ではその後も様々な実証試験が実施され、それらの成果は JEAC 4207 に盛り込まれている[4]。

2000年頃には SCC 対策材である低炭素系ステンレス鋼配管溶接部で SCC が検出され、深さ測定で過小評価が発生した。これについてはその後の実証試験で高度な探傷技術が必要であることが確認された[5]。また、2000年に日本機械学会「発電用原子力規格 維持規格」が発行され、欠陥寸法に基づく機器の残存寿命評価が規定された。これらの状況を受け、オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部に対するき裂深さの測定に関する UT システムの性能実証試験が 2006 年に開始されている[6]。

2.3 海外における取り組み

UT 信頼性に関する国際的な実証試験の代表的なものとして PISC (Programme for the Inspection of Steel Components) が日米欧の協力で実施されている。この PISC では欠陥付与試験体の回送試験 (RRT : Round Robin Test) が 1974 年から 1993 年にかけて 3 回実施されている[7]。PISC における重要な成果の一つとして、同じ超音波探傷装置 (装置) 及び検査要領 (手順書) を使用しても検査員により結果にばらつきが出ることが確認され、UT の信頼性を担保するには装置、手順書及び検査員を組み合わせた UT システムとしての性能を実際の試験体を使用して実証する必要があることが示された。

米国では PISC の成果や米国内における実証試験結果を参考として、1989 年に ASME Section XI の Appendix VIII (以下、App. VIII) として Performance Demonstration (PD) の要求が発行された。また、欧州では性能実証試験を協力して進めるために ENIQ (European Network for Inspection Qualification) が結成され、性能実証方法のガイドラインが作成されている。

3. UT システムの性能実証方法

3.1 欧米の方法とその特徴

UT システムの性能実証方法として良く知られているのは米国の ASME 方式と欧州の ENIQ ガイドラインに沿った方式 (以下、ENIQ 方式) である。この二つの方式は装置、手順書及び検査員を組み合わせた UT システムの性能を実機模擬の条件下で実証するとの主旨は共通であるが、その実施には異なる手法が採られている。ASME 方式と ENIQ 方式の違いを Fig.1 に示す。ASME 方式では装置、手順書及び検査員の組合せを、欠陥情報を隠した試験体を使用して一括確認 (目隠し試験) する方法が採られている (以下 ASME 方式を「PD 試験」と称する)。PD 試験ではその合否判定の根拠を、欠陥検出では検出確率 (POD : Probability of Detection) と誤検出率 (FCP : False Call Probability) で、欠陥寸法測定精度では平均自乗偏差 (RMSE : Root Mean Square Error) に求めており、このために大きさの異なる欠陥 10 個程度以上の探傷が必要となっている。この PD 試験の実施方法は App. VIII に詳細に記述されている。一方、ENIQ 方式ではガイドラインのみが定められているため、具体的な運用方法は各国がそれぞれに計画している[8]。多くの国は性能実証の対象を原子炉容器溶接部や異種金属溶接部など重要かつ技術的に UT が難しい部位に限定している。また、装置、手順書及び検査員それぞれに個別評価を許容しているために、装置と手順書の認証は書類審査による技術評価 (TJ: Technical Justification) で行い、検査員には何らかの実技試験を課している例が多い。

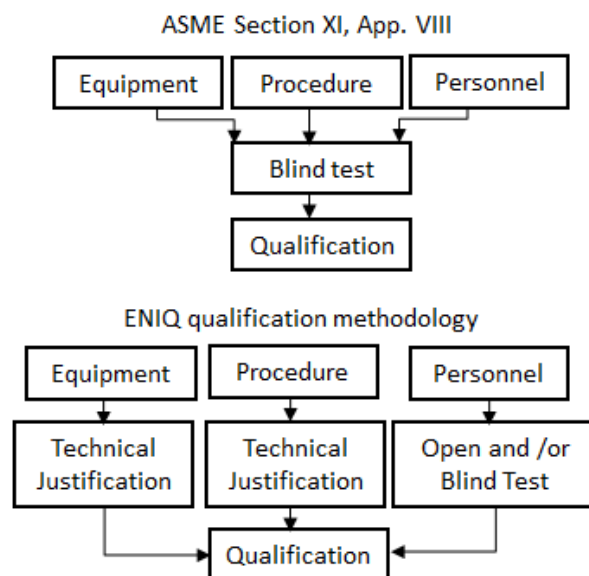


Fig.1 UT Qualification system of ASME and ENIQ

3.2 PD 試験の成果と課題

米国における PD 試験実施の効果は Electric Power Research Institute (EPRI)より配管溶接部 SCC の検出確率 (POD) の向上として報告されている[9]。PD 試験の効果を示した EPRI の資料に UTS の結果を加えたものを Fig.2 に示す。図中の PDI は EPRI が実施している PD 試験の呼称であり、Mini RRT 及び Piping inspection RRT は EPRI が米国内で実施した SCC の検出性に関する試験である。PDI は米国のみならず欧州やアジアの検査員も受験しているため、Fig.2 は日本の SCC 探傷技術が海外と同等以上であることを示している。

一方、上述の EPRI 資料では PD 試験の課題も指摘しており、一例として手順書が PD 試験合格を目標に特化される結果として様々な現場の状況に適応できなくなる可能性が述べられている。また、PD 試験では情報流出防止のために受験者への情報提供が制限されるために、技量改善の面では非効率な仕組みとなっている。その例として、国内のき裂深さ測定 PD 試験では惜敗した受験者の方が成績の悪かった受験者よりも再受験での合格率が低い実績があり、これは惜敗した受験者は失敗の原因を正しく認識するのが難しいためと推定している[10]。更に、PD 試験では手順書が検査会社のノウハウであるため、優れた技術でもその公知化が難しくなっている。運営面では情報漏洩防止のために多数の試験体が必要であり、欧州が ENIQ 方式を採用した動機ともなっている。

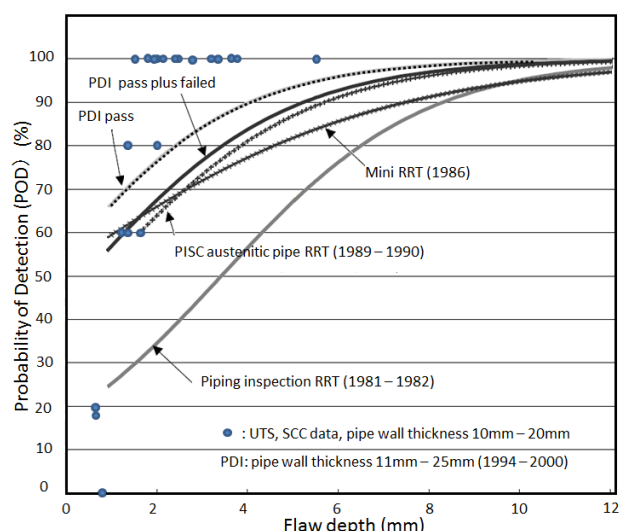


Fig.2 Improvement of POD by PD examination [9]

3.3 ENIQ 方式の成果と課題

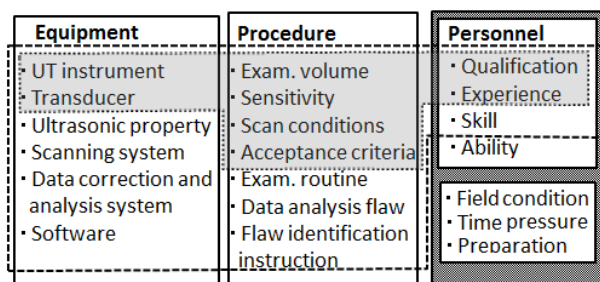
ENIQ 方式では各国が独自の性能実証方法を採用している。例えば手動 UT による SCC の検出では、スウェー

デンは検査員の目隠し試験を規格で要求しているがフランスでは手順書の中で検査員の訓練内容をクラス分けして要求している。また、検査員への要求を規定していない国もある[8]。この状況は検査会社を各国が相互認証する際の妨げとなっており、ENIQ では 2013 年に各国の認証機関で構成される作業会 (TGIQB: Task Group for Inspection Qualification Bodies) を結成して認証方法の違いの洗い出しに着手している[11]。

4. UT の信頼性と影響因子

4.1 POD とそれに影響する因子

3.2 項で米国での PD 試験実施による POD の向上を述べたが、POD はそれを算出した条件でのみ成立することに留意する必要がある。PISC などの経験から UT の信頼性に影響するとされる因子とそれを ISI 規程や PD 試験が網羅する程度を Fig.3 に示す。国内規程である JEAC 4207 やそれに基づく ISI 要領書は装置や感度校正法、探傷範囲などの条件を定めるが、超音波特性や装置の詳細な設定値の記載までは求めていない。また、検査手順も流れ図のような記載までは求めていない。一方、PD 試験では使用する装置の型式名、機器の詳細な設定条件及び探傷や判定プロセスを記載した手順書の提出が必要となっている。この点で PD 試験は安定した POD を得るための手順を忠実に再現するための手段と捉えることもできる。しかし、PD 試験においても検査員の業務遂行能力や探傷現場の状況あるいは検査工程の影響などのヒューマンファクター (人的因子) は対象外となっている。これらの人的因子に関しては、国内の場合は電力会社と検査会社間の検査量や工程の事前調整、他工事と干渉しない検査タイミングの選定、あるいは熟練検査員の配置及び検査員の継続雇用によるモチベーションの維持などにより良好に維持されてきたと考えられる。



ISI Standard (dotted box), PD exam. (dashed box), Human factor (solid box)

Fig.3 Coverage map of the factor which influences UT

また、POD 曲線は検査員の技量により変化するがそれには様々な因子が複合的に係っている。これまで行われた UT 検査員の人的因子に関する研究[12][13]で得られた主な因子とそれ等の因子の POD 曲線への影響を Fig.4 に示す。Fig.4 において、今後より高い周波数を使用する技術などが開発されれば超音波の波長を短くできる効果により検出限界値が小さくなる方向に働くと考えられる。三次元表示や開口合成など欠陥の視認を容易にする技術は POD 曲線を立ち上げる方向に働くと考えられる。欠陥判別手順の改良及び検査員の教育訓練は欠陥の見逃し防止と欠陥判別能力の向上に効果があるために POD 曲線を立ち上げる方向に働く。一方、Fig.4 に示した様々な人的因子は検査員の判断力や注意力を低下させ、欠陥の判別間違いや見逃しを引き起こすために POD 曲線を寝かせる方向に働く。

POD 曲線のこのような傾向から、UT 信頼性を維持するには教育訓練による検査員の技量維持と検査作業管理に係る人的因子を安定させることが重要となるが、ここでは、現場環境や工程管理などの人的要因は良好であることを前提に、教育訓練による技量維持を検討する。

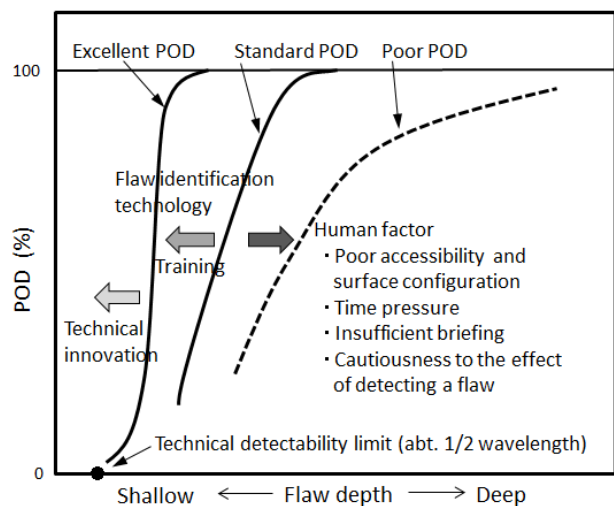


Fig.4 POD curve and Influencing factors

4.2 技量測定指標と欠陥判別プロセス

検査員の教育訓練では達成すべき技量レベルとそれを測定する指標を明確にする必要がある。代表的な指標としては 3.1 項で述べた POD と FCP が考えられる。UT における POD、FCP と検出すべき最小欠陥寸法との関係を模式的に表したものが Fig.5 である。検査員の技量を一定と仮定した場合、高い POD を達成するには検出すべき欠陥の寸法を大きくする必要がある。また、検出限界に近い

欠陥の検出を目標とすれば POD が低下するだけでなく FCP が増加する。このため検査員の技量試験では POD が十分に高く、かつ、FCP が許容できる範囲内に合格ラインが設定されている[14]。

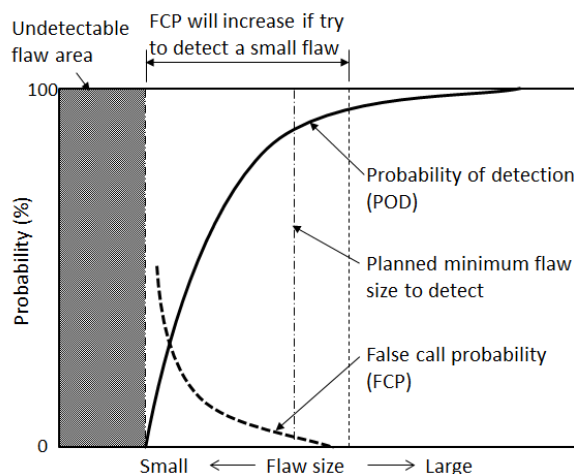
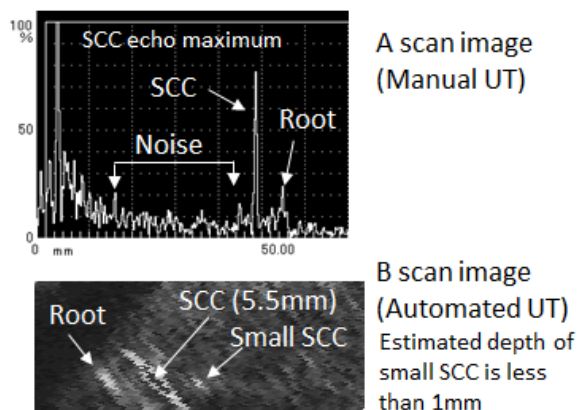
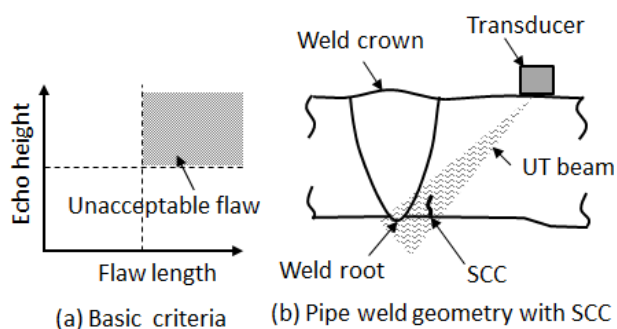


Fig.5 POD, FCP and minimum flaw size to detect

これまで述べた説明から、検査員の教育訓練で高い POD を目指すには、その目標を達成できている検査員の知識を取り込むのが効果的であると考えられる。

Fig.6 は検査員が欠陥を判別する過程を SCC と裏波を例に示している。(a)は UT 指示が基準エコー高さを超え、かつ、指示の長さが判定値を超えるものを欠陥と見做す場合である。形状が単純な構造物中に存在する欠陥の場合に相当し、検査員は丹念な探傷により目的を達成できる。一方、SCC はエコー高さに係らず有害欠陥として報告が求められるため、配管溶接部の探傷(b)では SCC エコーと裏波エコーの判別が必要となる。(c)は探傷時の観察画像を示すが、手動 UT では波形 (A scan) を観察しながら探傷が行われる。図では SCC、裏波及びノイズと称される溶接部や母材組織からのエコーが観察される。一方、最新の自動 UT ではデータを採取しながら平面図、断面図、波形などの表示が可能であり、また、同じ画像を探傷終了後に再生することも可能である。図は断面画像 (B scan) を示している。(d)、(e)、(f) は SCC と裏波のエコー高さ、指示長さ、及び指示位置の確率密度分布を模式的に示している。SCC と裏波ではいずれの場合も重なる部分があるため単純な仕切りはできず、検査員にはこれらの情報を総合して判別することが求められている。

経験豊かな UT 検査員はさらにエコーの形や探触子走査に伴うエコーの動きを加味して両者を判別している。



(c) Presentation of manual UT and auto UT

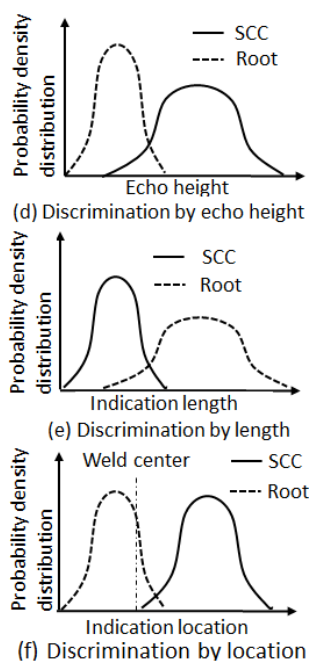


Fig.6 Discrimination of SCC and root by features

Fig.7 は手動 UT で観察されるエコーの形や探触子走査に伴うエコーの動きを示している。これら特徴は反射源の大きさや形状に起因するものであり、図中①はエコー高さ、②はエコーの位置である。③はエコーの立ち上がり時間で SCC は裏波に比較してこの時間が短い特徴があ

る。④は探触子の走査に伴うエコー先端の動きである。エコー先端の軌跡を破線で示すが SCC エコーの場合は単峰型の軌跡となるが裏波エコーはそれぞれの先端が個別に軌跡を描く。これは Fig.8 に示すように SCC が超音波ビーム幅の範囲内では比較的単調な形状の反射体であるのに対して、裏波エコーは小さく不規則に並んだ溶接ビードが反射源であることに由来する。材料からのノイズエコーは反射源が更に小さいために探触子の走査に伴いエコー高さが上下するのみで軌跡を描くことは少ない。

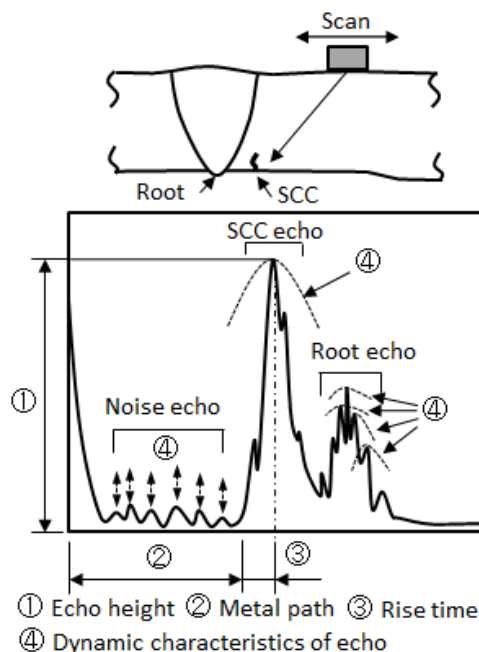


Fig.7 Echo shape and dynamic characteristics

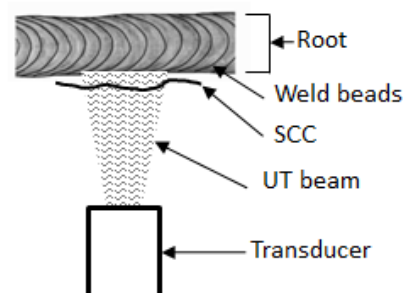


Fig.8 UT beam width vs. SCC and weld beads size

SCC の探傷では裏波エコーの他にも形状エコーや溶接部からのノイズエコーも出現するため、手動 UT 検査員は探傷しながらこれらの情報を選別し、重要と判断した情報を記録して持ち帰ることとなる。この情報選別時に判断ミスにより重要な指示エコーの情報が抜け落ちた場

合はその後のレビューでも察知することは困難であり、PODの低下を招くこととなる。一方、自動UTの場合は全ての情報が記録されるために探傷現場では正確なデータの採取に専念し、判定作業はデータを再現しながら行うことが可能となる。

5. 技量確保のためのシステムの検討

5.1 方法の選定

SCCの探傷を行う検査員には4.2項で述べたような欠陥判別にに関する知識が不可欠であるが、一般的なUT資格者にはその取得試験においてもこのような知識までは求められていない。また、ISIで損傷部位の探傷に巡り合う機会も希少となっている。このため、ISIを行う検査員にはこれらの知識と技量を獲得しそれを維持する機会の提供が必要となっている。この点でPD試験は実プラントを模擬した状況で探傷を行いその技量を証明する機会を提供するため、技量確保のためのシステムを検討する上では有力な候補となる。しかし、国内の実情を考慮した場合、検査の手順としてはJEAC 4207に基づく検査要領書が実績のある手法として定着しており、また、手動UTでは汎用の探傷装置が使用されている。さらにPD試験が技術の公知化や技術教育では非効率な側面を持つことを考慮すると、PD試験ではなく、現状の技術を生かしながら教育訓練を通して技量確保を図るのが国内でこれまで培った技術の継続の面からも効果的と考えられる。

この検査員の教育訓練についてはこれまでのように検査会社に任せる考え方もあるが、これまでは検査会社の自主的な活動であるために使用する試験体や教育内容にばらつきがあることが考えられる。したがって、今後とも検査員の保有すべき技量レベルを一定の水準以上に保つためには教育訓練に求める内容を明確に規定し、国内として統一するのが望ましい。

なお、先に述べたように手動UTと自動UTでは探傷から解析に至るまでのプロセスが異なるために教育訓練に求められる内容も異なると考えられる。次項にこれらを述べる。

5.2 手動UT検査員の教育訓練

手動UT検査員の技量と教育訓練の在り方に関しては、英国において大掛かりな調査が行われ示唆に富んだ報告がなされている[13]。その中では、検査員は欠陥でないと判断した理由の説明は容易であるが、欠陥と判断した理由の説明は苦手であり、検査員は全ての情報を集めずに

欠陥と判断してしまう傾向があること、また、順序立った検査を行わせるには判断のプロセスを明確にした手順書が必要であると述べられている。加えて、検査員の経験年数と技量の相関は強くないとの指摘もなされている。このような知見からも検査員の教育訓練は超音波探傷の原理及び4.2項に示したような欠陥判別技術を教育し、その後欠陥探傷を体験させることが重要と考えられる。

教育訓練のプロセスについての提案をFig.9に示す。実技は受講者の技量を確認する模擬探傷、欠陥判別技術を実際に体験する実技習得、及び習得度を確認する技量確認の3段階に分けた。最初の模擬探傷は対象者の技量を見極め、教育訓練計画立案の参考とするもので、簡単な模擬試験体を使用して走査方法や記録採取の正確さなどを確認する。次の実技習得が重要であり、正しい技術の習得を効果的に行うためにオープン試験体を使った実技体験を重視した訓練を想定している。最後の技量確認は目隠し試験体を使用した習得度の確認程度とするのが望ましい。この段階でハードルの高い試験を課した場合は、受講者が技術の習得よりも試験合格を目的化する可能性が大きいため注意を要する。むしろ技術に加えて人的要因に係る検査時の注意点や検査の意義に関する教育に時間を割く方が好ましいと考える。また、受講者が既に優れた技量を有している場合には、初歩的な内容の教育を省いて技量維持訓練に重点を移すことも必要と考える。

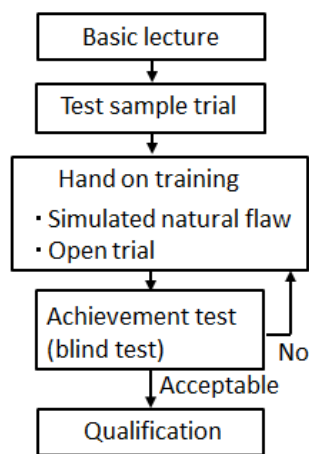


Fig.9 Outline of manual UT training program

5.3 自動UT検査員の教育訓練

自動UTでは記録採取は自動的に行われるためにデータ解析技術の訓練が中心となる。米国のPD試験でも自動UTではFig.10に示すように3回のPD試験を終了した後は装置と手順書は合格と認証され、その後はデータ解析技術のみのPD試験が実施されている。この時のPD試験

には先に行われた3回のPD試験で蓄積されたデータが使用されるが、自動 UT システムは検査会社により異なるためにデータ解析 PD 試験では検査会社毎に試験データが準備されている。国内でも検査会社毎に UT 装置が異なるために標準的な手順書の作成は困難であり、また、標準として内容を固定した場合は、各社における技術開発の足かせとなる可能性も考えられる。このため、手動 UT 検査員の教育訓練に使用する試験体で各社がデータを採取し、それをデータ解析法の教育訓練に活用するなどの案が考えられる。

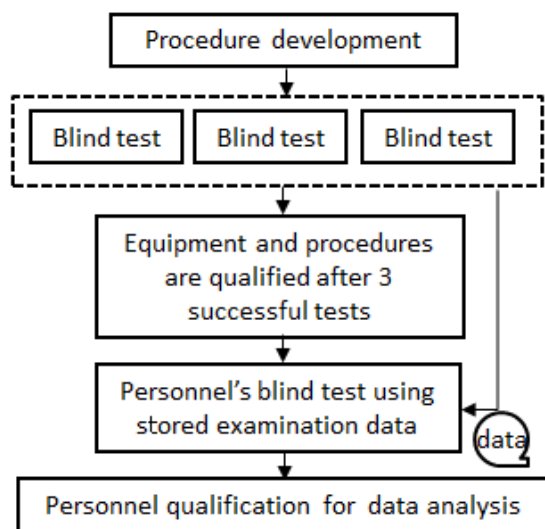


Fig.10 PD examination for data analysis

5.4 標準手順書の整備

米国では PD 試験開始当時は受験者が独自の手順書を開発して試験に臨んでいた。しかし、PD 試験を重ねるにつれて技術が集約され、EPRI が標準手順書を整備するようになってきている。現在では、手動 UT に関しては受験者の殆どが標準手順書を使用している。一方わが国では、JEAC 4207 に基本的事項が規定されてそれに基づいた ISI 要領書が使用されてきたが、これらの ISI 要領書は探傷機器の選定やその設定条件等に幅を持たせた記述となっている。今後とも現在の POD や FCP を良好な状態に維持するには、これまで検査員のノウハウとして扱われてきた知見を集約してより具体的に記述することにより、使いやすい標準手順書とする必要がある。特に検査員が従うべき探傷の手順や欠陥判別フローは必須であり、これに国内で培われた SCC の探傷や判定のノウハウ[15]を盛り込むことができれば、よりの確かな欠陥判別が可能になると考える。

5.5 教育訓練用試験体の要件

検査員の教育訓練を行うには、国内にあるプラントを代表できる形状及び欠陥を模擬した試験体を準備する必要がある。ただし、試験体の形状に関してはその全てを模擬する必要は無く、代表的な寸法を合理的に決定するのが適当と考えられる。また、付与する欠陥は、配管における劣化損傷事例がある SCC 及び疲労き裂とするが、最近では模擬き裂の製造技術が進歩しているため[16]、き裂の付与位置や大きさが制御し易い模擬き裂を教育訓練機関が超音波の性状を確認した上で使用するのが合目的と考える。但し、近年はプラントの検査で実際にき裂を探傷する機会は激減しているため、いくつかのき裂は実際の SCC あるいは疲労き裂として検査員にそれらの欠陥の超音波特性について確信を持たせる必要がある。また、これまで EDM 等の機械加工欠陥は実際のき裂とは反射特性が異なるために試験にはなじまないと判断されてきた。しかし、目的とするき裂の超音波的な反射特性を模擬しながらわかり易い形で示すとの教育的見地からは、意図した場所に意図する大きさの反射源を付与できる機械加工欠陥を活用することも望ましいと考える。いずれにしても自然/人工を問わず、実技に使用する試験体及び欠陥は教育訓練を実施する組織の専門家が使用目的と反射特性を十分に確認した上で使用する必要がある。

6. 結言

本論文では UT 信頼性の維持及び向上に係る国内外の取り組みを俯瞰しながら配管溶接部の SCC 探傷を行う検査員の技量維持の方策について検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- ① 手動 UT では ISI のための UT 規程 JEAC 4207 に準拠した探傷技術が定着しており、また使用されている探傷装置も汎用品であるため、新たに PD 試験を開始するよりも教育訓練の内容を明確に規定し、国内として統一した教育訓練を行うことにより技術の継続性と技量維持を図るのが望ましい。
- ② 手動 UT の教育訓練は超音波の基礎とそれに基づく SCC やその他反射源の示す超音波特徴に関する教育と実際にそれを体験する実技演習に重点を置くのが効果的と考える。
- ③ 自動 UT の教育訓練はデータ解析技術が中心となるが、装置が検査会社により異なるためにそれぞれの

装置で試験体のデータを採取し、そのデータを教育訓練に活用する案が考えられる。

- ④ 現在の検査要領書を進化させたより具体的で使いやすい標準手順書が必要となっている。特に検査員が従うべき探傷の手順や欠陥判別フローの記載は必須となる。
- ⑤ 教育訓練用試験体に付与する欠陥は、実際の SCC や疲労割れに拘らず、目的に応じて使い分けるのが合理的と考える。ただし、実際の SCC や疲労割れを実体験させることは必要である。

参考文献

- [1] L. G. Chockie: “Section XI of the ASME Code A New Approach to Qualifying Procedure and Personnel”, Proceedings, 7th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, pp. 83-86, (1985)
- [2] 昭和 61 年度溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書 供用期間中検査実証試験, 原子力工学試験センター, (1987):
- [3] 平成 16 年度原子力発電設備検査技術実証事業に関する事業報告書 (超音波探傷における欠陥検出性およびサイジング精度の確認に関するもの) [総括版 (1/2)], 原子力安全基盤機構, (2005)
- [4] JEAC 4207-2008 軽水型原子力発電用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程, 日本電気協会, 解説 A-5310, (2008)
- [5] 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: “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信試験について”, 原子力安全・保安院, (2003)
- [6] 日本非破壊検査協会規格「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」(NDIS 0603 : 2005) に関する技術評価書, 原子力安全・保安院, 原子力安全基盤機構, (2005)
- [7] PISC 計画総合報告書 (PISC III 報告書和訳版), 発電設備技術検査協会, (1999)
- [8] P. Jarret, M. Dib: “Comparison between NDE qualification standards and practices in different countries”, Proceedings of the 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, pp.28-34, (2013)
- [9] F. L. Becker, “Performance Demonstration – 25 Years of Progress”, Proceedings of Third International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Inspection Qualification V, (2001)
- [10] 笹原利彦: “配管溶接部 SCC の非破壊検査における超音波画像の活用に関する研究”, pp.35-37, 東京工業大学学位論文, (2014)
- [11] E. Martin, O. Martin, R. Booter, T. Walker: “Activities and future trend of the ENIQ network”, Proceedings of the 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, pp.19-24, (2013)
- [12] EC Joint Research Center: “Human reliability in inspection final report on action 7 in the PISC III”, PISC III Report No. 31, EUR 15641 EN, (1993)
- [13] B. McGrath, T. House: “Programme for the assessment of NDT in industry PANI 3”, Health and Safety Executive, RR617 Research report, (2008)
- [14] S. Doctor, S. Cumblidge, T. Taylor: “The technical basis supporting ASME code, Section XI, Appendix VIII: Performance Demonstration for Ultrasonic Examination”, NUREG/CR-7165, (2013)
- [15] 清水敬輔, 設楽親, 小林輝男, 山下理道, 岡田亮兵, 稲垣哲彦, 中田親秀, 長松弘, 近畑英之, 山本幸司, 枘明彦, 牧原善次, 高津光志, 岩田潔, 東海林一: “原子炉再循環系配管への超音波探傷試験実施・評価に関するノウハウ”, 保全学, Vol.8, No.4, pp.31-36, (2010)
- [16] M. Vavrous, K. Markulin, M. Kemppainen, I. Virkkunen, K. Miettinen, R. Paussu, J. Pirinen: “Effect of the different artificial flaw type of in qualification purpose from point of view of the inspection company”, Proceedings of the 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, pp.409-416, (2013)

(平成 26 年 10 月 14 日)