

超音波探傷試験技術者に対する UT シミュレータ訓練の有効性検討

Investigation of Applicability of Inspection Skill Training using UT Simulator for Ultrasonic Personnel

(一財) 発電設備技術検査協会 平澤 泰治 Taiji HIRASAWA Member
(一財) 発電設備技術検査協会 松田 誠司 Seiji MATSUDA
(一財) 発電設備技術検査協会 牧原 善次 Zenji MAKIHARA

In our country, the ultrasonic testing (UT) has been carried out according to the JEAC 4207 in ISI. In this code, the ultrasonic personnel are required to the education and training concerning the UT of ISI in the nuclear power plant. Therefore, the ultrasonic personnel are trained to keep the high-level skills such as defect detection, classification of detected echoes and so on, using the own training program of the inspection companies. Thus, in order to keep the inspection skills of the ultrasonic personnel, it is necessary to conduct the training program with transparency and objectivity. The training for ultrasonic personnel is two approaches. One is approach using the real specimen, UT probe, UT equipment and so on. The other is approach the UT simulator using the simulated specimen, UT probe and so on. In order to investigate the manner of utilization of UT simulator, the trial of UT training for ultrasonic personnel was conducted using the UT simulator with ultrasonic waveform data in austenitic stainless steel piping welds. In this paper, the outline of the UT training program for ultrasonic personnel was shown. Then, the results of UT simulator training were shown, and applicability of the UT simulator for UT training were investigated.

Keywords: In-service Inspection, Ultrasonic Testing, UT Training Program, UT Simulator, Trial of UT Simulator Training, True Call Probability, Miss Call Probability, False Call Probability

1. 緒言

原子力発電プラントの供用期間中検査 (ISI : In-Service Inspection) では、体積検査として超音波探傷試験 (UT : Ultrasonic Testing) が行われ、機器・構造物の健全性の確認を行っている[1][2]。ISIにおける UT では、運転中に発生する亀裂を確実に検出することが要求されており、UT を行う試験技術者には高い探傷技量 (欠陥検出能力) が求められている。そのため、各国では一般的な UT 資格に加えて、独自の方法を定めて試験技術者の技量確認を行っており、欧米では、性能実証 (PD : Performance Demonstration) 試験[3]や技術実証 (TJ : Technical Justification) [4][5]で実施している。

一方、わが国では、ISI における UT は、JEAC 4207[2]に従って実施している。この規程では、試験技術者に対する訓練・経験について要求しているものの、具体的な訓練内容については明記されていない。そのため、プラントメーカ (検査会社含む) は、独自の訓練プログラムを定めて運用し、試験技術者の探傷技量の習得・維持に努めている。このように、わが国の試験技術者に対する要求事項が、欧米のそ

れと異なっている要因としては、過去に実施した国内調査研究[6][7]において、熟練した試験技術者は十分な探傷技量を保持していたこと、調査研究の成果及び知見を上記規程に反映したこと等が挙げられる。これらの運用については、現状、試験技術者の探傷技量が問題となる事象は生じていないが、透明性、客観性及び説明性をより向上させる観点から、試験技術者の探傷技量の確認方法に関する制度の構築が要望されている。また、試験技術者の技量訓練に関する提言[8]、探傷技量に及ぼす訓練の有効性に関する検討結果[9]等が報告されており、訓練の重要性や効果が認識されている。

このような背景から、ISI で UT を行う試験技術者の探傷技量の維持・向上を継続的に確保するための訓練制度の構築に向けた検討が進められており、実運用を想定した、ステンレス鋼配管継手試験体を用いた試験技術者に対する訓練 (試運用) の結果が報告されている[10]。

本報告では、初めに UT 訓練制度 (案) の概要を紹介する。次に、実際の試験体や探傷機材を使用せずに、試験技術者が模擬的に行う探傷操作に応じて探傷波形を表示させる UT シミュレータ[11]を用いた、試験技術者に対する UT シミュレータ訓練 (試運用) の結果を示すとともに、UT シミュレータの UT 訓練への適用性について検討した結果を示す。

2. UT 訓練制度の概要

現在検討中の UT 訓練制度（案）は、ISI で UT を行う試験技術者の探傷技量の習得・維持を目的とした制度で、以下の考え方に基づいている。

- ① 透明性及び客観性を確保した第三者による訓練制度とする。
- ② 現行の UT 規程（JEAC 4207）に基づく標準的な探傷訓練とする。
- ③ 訓練は、UT に関する知識及び探傷技量の習得（技量習得）とその確認（技量確認）とする。
- ④ 技量確認では、海外の方法（特に、米国の PD 制度）と比較して遜色の無い達成度を設けた内容とする。

上記の考え方をもとに検討した UT 訓練制度（案）の枠組みを Fig.1 に示す。本制度では、透明性及び客観性を確保するため、第三者機関としての訓練機関（中立訓練機関）を設置する。中立訓練機関では、訓練プログラム、訓練用教材（試験体、探傷機材等）等を整備し、本制度の管理・運営を行う。訓練の受講者は、試験員及び試験評価員に加えて、試験員及び試験評価員に対して定期的に反復訓練を行う訓練指導員とする。中立訓練機関では、技量確認で所定の達成基準を満足した受講者に対して認定を行う。

一般訓練機関（通常、プラントメーカ又は検査会社）は、反復訓練を行う機関として中立訓練機関に申請し、承認された組織とする。訓練指導員は、原則として、一般訓練機関に属し、反復訓練で試験員及び試験評価員に対して探傷技量の維持のための指導を行う。また、中立訓練機関は、運営に直接関与しない外部の委員で構成される訓練諮問委員会に対して、訓練に係わる内容について報告する。訓練諮問委員会では、訓練が独立性及び公平性をもって運営されていることを確認し、必要に応じて提言を行う。

訓練の種類と有効期間を、Table 1 に示す。認定訓練は、定められた業務を遂行するために必要な技量を習得するための訓練で、技量習得と技量確認で構成し、その有効期間を 5 年とする。更新訓練は、認定の有効期間が満了するとき、その技量を維持・継続するための訓練で、技量習得と技量確認で構成し、その有効期間を 5 年とする。これらの訓練は、透明性及び客観性を確保するため、中立訓練機関で受講する。次に反復訓練は、認定の有効期間において、その技量の維持を目的に定期的に行う訓練で、その有効期間を 1 年とする。この訓練は、一般訓練機関又は中立訓練機関で受講する。このように運用することで、試験技術者の探傷技量を継続的に維持できると考える。

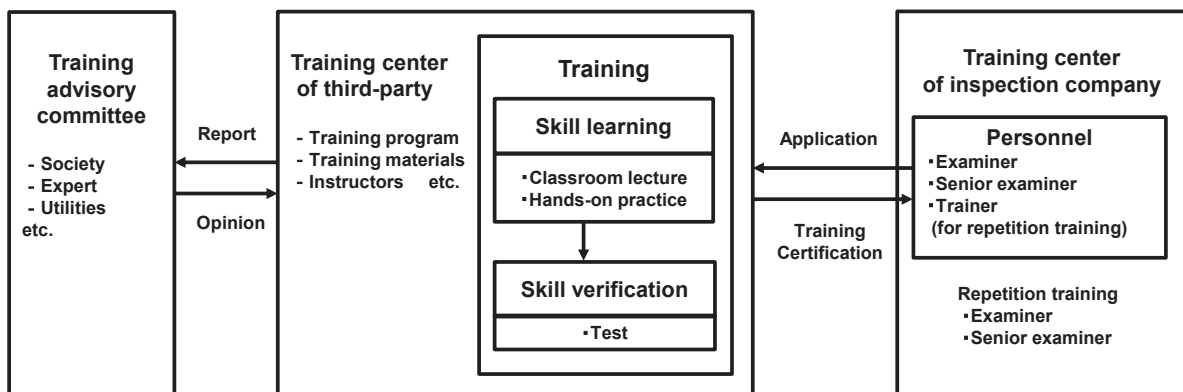


Fig.1 Framework of UT training program

Table 1 Outline of kinds of training

Kinds of training	Contents	Training body	Period of validity
Certification training	• Skill Learning • Skill Verification	Training center • 3 rd party	5 years
Renewal training	• Skill Learning • Skill Verification	Training center • 3 rd party	5 years
Repetition training	• Skill maintenance	Training center • Inspection company • 3 rd party	1 year

3. UT シミュレータによる訓練

3.1 UT シミュレータ

UT シミュレータは、探触子位置測定装置、講師用モニター、PC、試験技術者用モニター、模擬配管及び模擬探触子で構成されており、その外観を Fig.2 に示す。

UT シミュレータは、実際の試験体や探傷機材（超音波探傷器、超音波探触子等）を使用せずに、試験技術者が模擬的に行う探傷操作に応じて、事前に装置に組み込んである探傷波形データを表示させる装置である。主な特徴を以下に示す。

- ① 探傷波形データを再現できる。
- ② 探傷波形データは、複数のデータを任意に組合せて作成できる。
- ③ 模擬探触子の走査軌跡を記録・再生できる。
- ④ 作業環境によらず、どこでも使用できる。
- ⑤ 模擬探触子の押し付けによる探傷波形の変化は再現できない。

3.2 訓練の概要

第2章で述べた UT 訓練制度（案）では、一般に、実技訓練は、実際の試験体や探傷機材（超音波探傷器、超音波探触子等）を用いて行う。ここでは、UT シミュレータの UT 訓練への適用性を検討するため、UT シミュレータを用いた実技訓練の試運用を行った。

UT シミュレータ訓練は、オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手を対象に、試験員に対する訓練（欠陥検出性試験）として実施した。ここで、受講者は、原子力プラントメーカーの協力を得て、UT レベル2以上の試験技術者とし、合計6名で行った。

UT シミュレータによる探傷訓練は、Fig.3 に示すように以下の手順で行った。また、訓練は2班に分け、各々の訓練時間は7時間で行った。

- ① 指示書の説明
- ② UT シミュレータの操作方法の説明及び操作の習熟訓練
- ③ UT シミュレータによる探傷訓練（技量習得）
- ④ UT シミュレータによる探傷訓練（技量確認）
- ⑤ 試験結果の分析・評価

技量習得では、UT シミュレータの探傷操作に慣れることを目的に、探傷領域（溶接線に対して片側探傷）1 領域について、オープン方式の欠陥検出性試験（探傷及び記録作成）を行った。ここで、受講

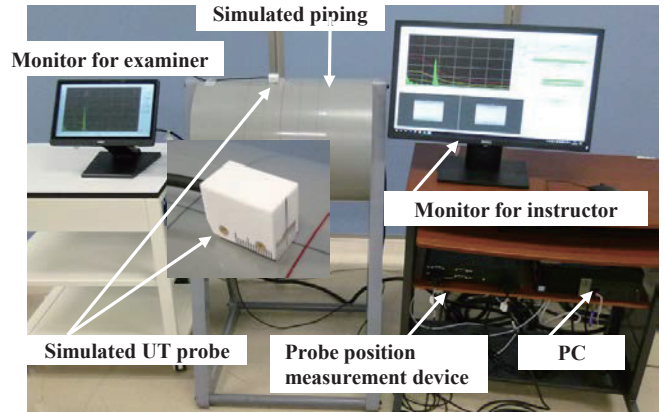


Fig.2 Overview of the UT simulator

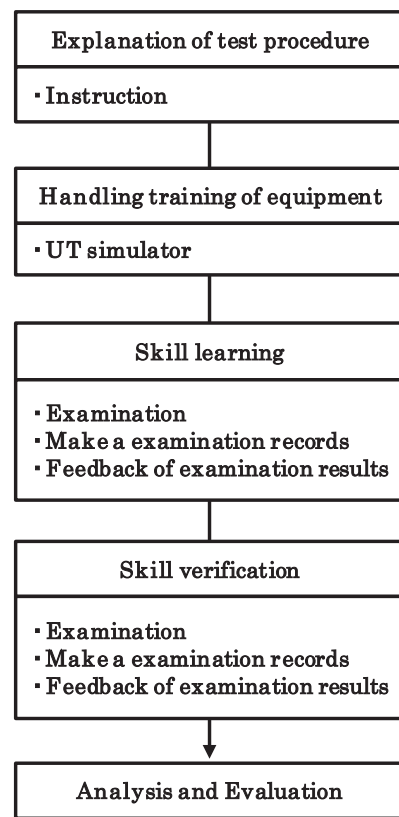


Fig.3 Flowchart of UT training trial

者から提出された探傷記録をもとに、探傷結果の評価、欠陥エコーと形状エコー（主に、裏波部エコー）の識別性、探触子の走査方法等についてフィードバックを行った。

次に、技量確認では、ブラインド方式の欠陥検出性試験を行った。ここでは、受講者に対して1 探傷領域ずつ提示し、後戻り探傷は行わないこと、また、探傷時間は、1 探傷領域あたり 40 分として行った。ここで、全ての探傷（ここでは、6 探傷領域）が終了したのち、受講者に対して、UT シミュレータ訓

練に関するヒヤリング及び受講者の試験結果に関するフィードバックを行った。

3.3 試験結果の分析・評価

技量確認として行った欠陥検出性試験の分析結果の一例を、Fig.4に示す。図は、正答率、欠陥の見逃し率、欠陥の誤検出率で表し、各々以下のように定義した。

- ・正答率：全指示数（探傷領域内に付与した欠陥数＋誤検出数）に対する欠陥検出数の比率（TCP：True Call Probability）
- ・欠陥の見逃し率：全指示数に対する欠陥の見逃し数（欠陥エコーを欠陥以外のエコーと判定した数＋欠陥の未検出数）の比率（MCP：Miss Call Probability）
- ・欠陥の誤検出率：全指示数に対する欠陥の誤検出数（欠陥以外のエコーを欠陥エコーと判定した数）の比率（FCP：False Call Probability）

Fig.4より、正答率は約81%、見逃し率及び誤検出率は、各々約9%であった。

ステンレス鋼配管溶接継手の探傷で検出される代表的なエコーは、Fig.5に示すように、欠陥エコーの他に、裏波部エコー、柱状晶伝搬エコー、内表面エコー等が挙げられる。ここで、欠陥の見逃し及び誤検出の要因について調べた。欠陥見逃し時の誤判定の要因を、Fig.6に示す。欠陥の見逃しの件数は5件で、そのうち欠陥エコーを裏波部エコーと判定した件数が2件、欠陥の未検出の件数が3件であった。

次に、欠陥の誤検出の要因を、Fig.7に示す。欠陥以外のエコーを欠陥エコーと誤判定した件数は5件で、そのうち裏波部エコーが4件、内表面エコーが1件であった。

上述したように、技量確認（欠陥検出性試験）では、正答率が約81%であり、概ね良好な結果であったと考えられる。一方、欠陥の見逃し及び誤検出が全体の約18%を占めていた。受講者のヒヤリング等から、これら誤判定した主な要因は、今回の訓練で使用したUTシミュレータの探傷波形の動きが、通常使用している超音波探傷器に比べて粗く、そのため欠陥エコーと形状エコーの分離・検出が難しかったものと考えられる。また、UTシミュレータの探傷操作に慣れず（受講者1名）、探傷に集中できなかったことも挙げられる。さらに、震災から7年、受講者の多くが実機のISIから遠ざかっており、日常

的に試験体を探傷する機会がほとんどなくなったことから、探傷技量が若干低下したものと推察される。このことから、試験技術者の探傷技量の習得・維持のための訓練が重要であるといえる。

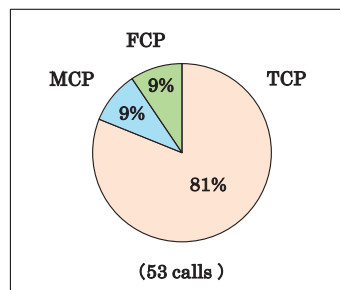
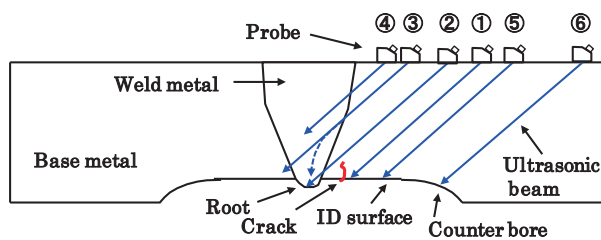


Fig.4 TCP, MCP and FCP in training data using the UT simulator



- ① Crack echo
- ② Root echo
- ③ Dendritic echo
- ④ Weld metal echo
- ⑤ ID surface echo
- ⑥ Counter bore echo

Fig.5 Typical detected echoes in austenitic stainless steel piping welds

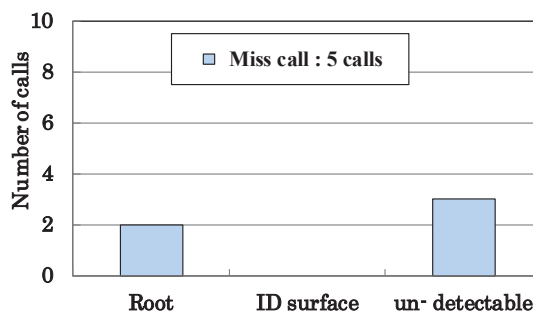


Fig.6 Distribution of miss call in training data using the UT simulator

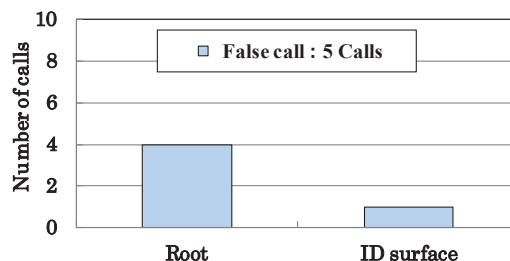


Fig.7 Distribution of false call in training data using the UT simulator

次に、UT シミュレータによる訓練と手動 UT による訓練を比較検討するため、UT シミュレータを対象とした探傷領域と同じ領域について、実試験体を用いた手動 UT による訓練を行った。手動 UT による技量確認（欠陥検出性試験）の分析結果の一例を、Fig.8 に示す。図より、正答率は約 88%、欠陥の見逃し率及び誤検出率は、各々約 6%であり、UT シミュレータの結果と概ね同様の結果であった。また、欠陥の見逃し及び誤検出は各々3 件で、いずれも欠陥エコーと裏波部エコーの識別性がその要因であった。

4. UT シミュレータの UT 訓練への適用性

上記で述べたように、UT シミュレータによる訓練（試運用）では、技量確認における正答率が 80%以上であったこと、また手動 UT の結果と概ね同様の結果であったこと、さらに、誤判定した要因の多くが、欠陥エコーと裏波部エコーの識別性であり、訓練ポイントが明確になったこと等から、UT シミュレータは、UT 訓練に適用できる見通しが得られた。

ここで、UT シミュレータの適用方法について検討した。UT シミュレータは、3.1 節で述べたように、多くの長所を有しており、これらの長所を活用した訓練を行うことができる。ここでは、3.1 節に記載の特徴をもとに、適用方法を記載した。

①探傷波形の再現については、探傷波形データは、探触子位置と探傷波形が 1 対 1 で対応しており、探触子を適正に走査することで探傷波形を再現できるため、探触子の走査に伴う探傷波形の挙動を理解する上で、極めて有用なツールである。特に、近接したエコーの分離・検出、欠陥エコーと形状エコー（特に裏波部エコー）の識別等に有効であり、上記の訓練（試運用）で示された訓練ポイントに合致し、試験技術者の探傷技量の向上に有効と考えられる。

②複数のデータを任意に組合せて探傷波形データを作成することについては、UT シミュレータに組込む探傷波形データは、1 つの試験体あるいは複数の試験体から取得した種々の UT データを任意に組合せて作成することができるため、訓練ポイントに応じた様々な探傷波形データを用いて、試験技術者に対する訓練を行うことができる。

③模擬探触子の走査軌跡の記録・再生は、探傷時の試験技術者の手の動きを確認するために活用できる。Fig.9 に、探傷時の走査軌跡の一例を示す。図より、溶接線に対して右側から溶接線に向かって探傷

しており、左右方向にジグザグした線が探触子の走査軌跡を表している。走査軌跡を表す線が密集している領域は、その領域を詳細に探傷していることを、また密集していない領域は、探傷回数が少ないことを表している。このような走査軌跡の表示は、試験技術者自身が、実際にどのように探触子を走査しているかを確認できるため、実探傷における走査方法の改善等に活用できる。

次に、訓練終了後に受講者へのヒヤリングを行った。ほとんどの受講者が、UT シミュレータは UT 訓練に適用できる、との意見であった。特に、探触子の走査軌跡の再生は、今まで経験していないものであり関心が大きかった。

UT シミュレータは、上述したように、探傷波形の挙動の理解に有用であり、実際の試験体や探傷機材を使った訓練と併用することで、訓練の一層の効果が期待できる。

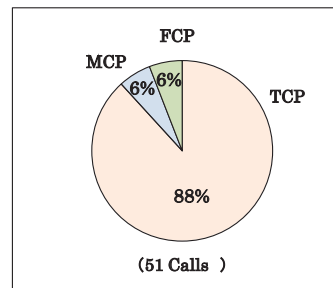


Fig.8 TCP, MCP and FCP in training data using flawed specimen by manual UT

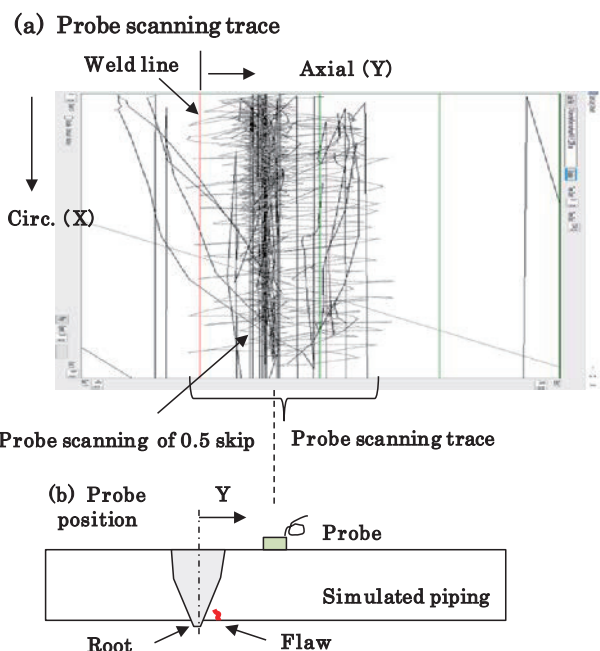


Fig.9 Scanning trace of UT probe in the UT simulator

4. 結言

現在検討されている UT 訓練制度 (案) において、試験技術者に対する技量習得及び技量確認で行う実技訓練に、UT シミュレータを活用することを検討するため、UT シミュレータを用いた、試験技術者に対する UT シミュレータ訓練の試運用を行った。

訓練は欠陥検出性試験として行い、試験結果の分析から、正答率は概ね良好な結果が得られたが、一部、誤判定したエコーも認められた。誤判定要因の分析から 受講者に対する訓練ポイントを明らかにした。また、UT シミュレータと同じ探傷領域を対象に、実試験体を用いた手動 UT 訓練を行った結果、UT シミュレータと概ね同様の結果が得られた。

次に、UT シミュレータの UT 訓練への適用性について検討した結果、UT シミュレータは、探触子走査に伴う探傷波形の挙動、近接したエコーの分離・検出方法、試験技術者の探触子走査状況等の理解に有効であると考えられ、UT シミュレータの訓練における活用方法を提案した。

これらのことから、UT シミュレータは、UT 訓練に活用できる見通しが得られたと言える。

今後は、UT シミュレータ訓練 (試運用) で示された課題の改善に取組み、より実効性のある訓練内容を目指す予定である。

謝辞

本検討で実施した「UT シミュレータ訓練の試運用」には、原子力プラントメーカー (検査会社含む) の試験技術者に協力頂き、貴重なデータを得ることができた。ここに、感謝の意を表す。また、本検討は、電力共同委託として実施したものである。

参考文献

- [1] (一社) 日本機械学会、”発電用原子力設備規格 維持規格 (2008 年版) ”、JSME S NA1-2008、2008.
- [2] (一社) 日本電気協会、”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 (JEAC 4207-2008)”、2008.
- [3] ASME, “Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI Appendix VIII”, 2015.
- [4] EC Joint Research Centre, “Final Report of the First ENIQ Pilot study”, ENIQ Report No.20, EUR 19025 EN, 19025 EN, 1999.
- [5] P. Jardet and 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, 2013, pp.28-34.
- [6] (独) 原子力安全基盤機構、”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の確認に関するもの) [総括版] ”、05-基材報-0001(2/2)、2005.
- [7] (財) 原子力工学試験センター、”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”、1987.
- [8] 笹原利彦、”超音波探傷技術者の技量訓練への提言”、保全学、Vol.14,No.1、2015、pp.83-90.
- [9] 平澤泰治、小林輝男、牧原善次、南康雄、”ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波探傷試験員に対する教育・訓練の有効性に関する検討”、保全学、Vol.15,No.1、2016、pp.77-91.
- [10] 平澤泰治、小林輝男、牧原善次、南康雄、”超音波探傷試験員に対する教育・訓練の有効性検討”、日本保全学会 第 13 回学術講演会 要旨集、2016、pp.13-17.
- [11] 東海林一、秀浩一郎、”技量認定試験に使用可能なバーチャル UT システムの試作”、電力中央研究所 研究報告書 Q14007、2015.

