特集

非破壊検査技術

デジタルRT技術について*

篠田 邦彦**

Introduction of Digital Radiography Technique*

by SHINODA Kunihiko**

キーワード 非破壊検査, 放射線透過試験, デジタルラジオグラフィ

1. はじめに

X線は、ドイツの物理学者であるレントゲンによって、1895年に1000ページ以上の分厚い本やガラスを透過するなどの透過能力を有する性質などがあることが発見され、数学の未知数を意味する「X」の文字を使い仮の名前として名付けられた。これが、物の内部を非破壊的に見ることの始まりといえ、非破壊検査の原点といえる。また、フランスの物理・化学者であるヴィラルールによって、1900年にウランから透過性が高く電荷を持たない放射線を発見し、この放射線は1903年にイギリスの物理・化学者であるラザフォードによってガンマ線と名付けられた。これらの放射線技術は、いち早く医療の分野で取り入れられ、ラジウムの発見者として知られているポーランド出身の物理・化学者であるキュリー夫人は、1914年に第一次世界大戦が始まると、戦場で傷ついた兵士の治療に役立つよう、X線装置を用いて体内の傷害の具合、弾丸や破片の位置を確認する方式がとれるような体制づくりに力を尽くし、体内を非侵襲で検査する手法として用いられた。その後、1920年を過ぎてから工業分野での利用が始まり、非破壊検査の歴史の第一歩が築かれた。

構造物などの健全性を確保し社会安全を守るためには放射線透過試験 (Radiography Testing, 以下、RT という。) は不可欠な存在としての役割を確立した。歴史的には、国内で最初の放射線透過試験装置は1934年頃にドイツより導入されたようである。具体的には、構造物の検査としては1945年頃になって造船業界での溶接部検査に用いられるようになり、次第に压力容器、構造物の検査として不可欠な地位を築き、非破壊試験の代表となってきた。1965年頃に国産の高エネルギーの線形加速器 (ライナック) が開

発されたことで、厚板検査が可能となり、検査技術、溶接検査の信頼性が大きく向上した。

近年の科学技術の発達に伴って、画像表示の分野では、デジタル化が急速に進んでおり、最近ではカメラや放送などデジタル画像が広く社会生活に浸透している。非破壊の分野においても、電気信号を扱う検査方法を中心にアナログからデジタルへの動きが進んでいるが、本稿では、RTについてのデジタル検査技術への動きを紹介する。

デジタル検査技術は、従来のX線フィルムの透過試験方法をアナログとしたときに、デジタル技術を全て含んだ総称の言葉であり、特にデジタルラジオグラフィ (Digital Radiography) と呼んでいる。

非破壊検査の分野でデジタルラジオグラフィの言葉が広がるきっかけになったのは、1980年頃に、イメージングプレート (Imaging Plate) と呼ばれる画像デバイスと撮影システム (CR システム) が登場したことである。それ以前にもイメージインテンシファイア (Image Intensifier) などの撮影システムが発明され、医療分野でも透視観察が盛んに行われ始めていた。その後フォトダイオードや半導体薄膜からなる CCD など固体撮像素子が急速に発展し、現在ではデジタル化が医療分野ではほとんどを占める。これらは2次元の画像デバイスであるが、1次元の固体撮像デバイスも進歩し、ラインセンサーカメラの登場に引き継がれている。

デジタルラジオグラフィは医療では CT, MRI, PET 及びガンマシンチカメラなどの急速な発展に伴って、検査画像を電子技術で採取、処理、表示、保存するということが一般に受け入れられるようになってきた。

このようなきっかけのもと、工業的な非破壊検査においてもこれらを含め様々な種類のデジタルラジオグラフィ技術が研究開発され、その技術を積極的に導入、利用していく流れがある。

*原稿受付 平成24年4月17日

** 非破壊検査(株) Non-Destructive Inspection Co., Ltd

2. デジタルラジオグラフィの特徴

デジタルラジオグラフィはX線フィルムの透過試験方法と比較し、いくつかの特徴がある。これらはすべてに共通するものもあれば、各々のデジタルラジオグラフィの撮影システム独自の特徴を持つといったものもある。

しかし、デジタル情報として画像化されると同じ画像処理手法を適用することができる。

ここでは、デジタルラジオグラフィの撮影システムの特徴を述べる。

① 従来の放射線透過試験に比べて高感度

画像情報は検出器が放射線を受け、電気信号に変換されることから生じる。通常よく使われるX線フィルムの種類のものと比べ、デジタルデバイスにはそれより高い放射線感度を持つものが多い。これにより、少ない放射線量で撮影できることになる。

② 照射時間を短縮でき効率的な撮影が可能

検出器が高感度なため、通常より短時間で撮影可能であり、より効率的な作業計画が可能となる。

また、X線フィルムのような写真処理（現像）が不要なため、観察までに至る時間も短縮が可能となり、結果が早く分かることになる。

特に透視法で用いられるものは30フレーム/秒の画像を連続的にリアルタイムに観察することができる。

③ 肉厚変動の大きな部材でも1回の露出で撮影可能

X線フィルムでは一定以上の放射線が照射されるとフィルム濃度が飽和し、飽和した個所については情報が得られない。したがって、このような個所については、別条件にて再撮影を実施するなどが必要となってくる。

このように画像化においては、ダイナミックレンジ（有効な照射量範囲）が存在し、デジタルデバイスの中にはフィルムの二桁以上の広いダイナミックレンジを有するものがある。

④ 画像処理により画質の向上が図れる

画像情報がデジタル化されて取得できるため、その後の各種の画像処理が可能となり、目的・用途に応じて、様々な手法・技術の展開が期待できる。

⑤ パソコンデータとして画像保存が可能

保存はX線フィルムとは異なり、パソコンデータとして保存ができることより、管理スペースが小さく、撮影した画像データの検索が非常に容易である。さらに、劣化の少ないことも挙げられる。

その反面、データのバックアップやデータの漏洩については慎重に取り扱う必要がある。

⑥ 記録はプリンター出力にて複数でも提出可能

パソコンデータであるため、通常書類と同様にプリンター出力にて（プリンターの性能による画質に注意する必要があるものの）複数枚の提出が可能である。

⑦ 上述の長所に対して短所もある

装置コストが高い、装置の堅牢性が低く、取り扱いに注意が必要、画質がX線フィルムに及ばないものもあるなど、いろいろ問題もある。しかし、検査の目的に応じて、克服できることも多い。

⑧ 検査員に必要な知識

上述のようなX線フィルムとは異なる特徴を有することにより、以下のような知識が必要となってくる。

- 画像処理技術の理論及び目的に応じた最適処理技法の選択の知識
- X線検出器のノイズ源についての理解
- X線検出器によるエネルギー特性についての理解
- X線検出器の粒状性（コントラスト）及び解像度の理解
- デジタルラジオグラフィ装置の理解及び要求性能の担保及び確認 など

⑨ 工業用X線フィルムの値上げ

工業用X線フィルムは原料の高騰で度重なる値上げが続いており、上げ止まりの兆しはまだ見えないことも、デジタルラジオグラフィへの移行に拍車をかけるものである。

3. 代表的なデジタルラジオグラフィシステム¹⁾

放射線検出器としては、X線イメージンシファイア、X線ラインセンサー、フラットパネルディテクタ、コンピュータドラジオグラフィシステムなどがあり、それぞれの特徴を有しており、用途に応じた使い分けが必要である。また、医療分野ではすでに一般化されている、物体を輪切りにしてその断面図を観察するCT（断層撮影）法も、小型部品などの検査に適用されている。

以下にこれらの代表的なデジタルラジオグラフィについて、概説する。

3.1 X線イメージンシファイア

健康診断でのバリウム胃検査の画像化装置としてよく使用されているのが、X線イメージンシファイアである。X線イメージンシファイアは図1に示すような構造をしており、入力蛍光面（CsIなどのシンチレータ）の発光を受けて光電面から光電子が放出される。これら光電子は加速・集束され出力蛍光面に至る。出力蛍光像は入力蛍光面に比較し、面積が小さく絞られ、電子ビームの加速エネルギーとも合わせて、百倍以上の発光輝度が得られる。このシステムはこれらの高感度を利用したリアルタイムによる観察（透視法）が可能である。

X線イメージンシファイアは、数インチから10数

図1 X線イメージンシファイアの構造（東芝電子管デバイス株式会社殿ご提供）²⁾

インチまでの入力視野のものがあり、検査対象物の材質と外形寸法及び検査目的に応じて選択する。

また、このデバイスは、光電子増倍管でX線から変換された電子を増幅されることができ、X線に対する感度が非常に高いという特徴がある。しかし、出力として画像に至るまでに多くの変換工程が必要であり、また出力面が蛍光膜であるため画像には焼き付き、にじみを含むことがある。

X線イメージインテンシファイアはX線受光面が球面上となっているため、画像化されたときにはシェーディングと呼ばれる画面中心部が明るく、周辺部が暗くなる現象が起こる。さらに、図2に示すように、画面の外側へ行くほど、画像が湾曲する現象も発生する。

テレビ信号への変換は、X線イメージインテンシファイアの二次蛍光面(出力面)に移った画像をCCDカメラで撮影しており、多画素数のデジタルCCD撮像する技法も開発されている。しかし、二次蛍光面は $\phi 20\text{mm}$ 程度であり、そこに映し出される画像をCCDカメラで接写しているため、解像度の点では限界が生じる。

X線イメージインテンシファイアにおいて、近年開発及び様々な分野で利用されようとしている技術として、カラー・イメージインテンシファイアがある²⁾。デジタルラジオグラフィにおいて画像のカラー化は、非破壊検査に携わる技術者やユーザに望まれていた。現在でも、X線フィルムを用いたラジオグラフィ及びデジタルラジオグラフィはX線(またはガンマ線)の透過線量を、その強弱に応じたモノクロ画像として表示しているものがほとんどである。画像の輝度値によって、疑似カラー処理を適用してカラー表示を行うことはできる。しかし、元画像にノイズが含まれ、それが色づけされた場合、かえって識別しにくくなることもある。

一般的なX線イメージインテンシファイアは、X線イメージインテンシファイアに入射する放射線強度に応じた出力蛍光体(シンチレータ)の発光量をモノクロ画像として撮影するが、このカラー・イメージインテンシファイアは図3に示すように蛍光体の組成をうまく調整することで、強度によって異なる色(赤R、緑G、青B)に発光するようにしたものである。これとカラーカメラを組み合わせることで、非常にダイナミックレンジが広く、しかも高感度な放射線検出器として動作させるものである。肉眼の視認性はモノクロよりカラーの方が優れるので、疑似カラー表示とは基本的には異なるカラー表示能力を発揮するカラー・イメージインテンシファイアは、画期的にラジオグラフィの画質改善をもたらす可能性を持つ。このカラー・イメージインテンシファイアが開発されてから様々な分野でその応用が模索されており、そのいくつかはすでに実用レベルの普及が進んでいる。

3.2 X線ラインセンサー

X線ラインセンサーは、各空港の手荷物検査装置や食品の異物検査機で採用されているデバイスであり、表面にX線で発光するシンチレータを蒸着し、その下にフォトダイオードなどの光電変換素子を一列に並べたもので、X線-光-電気信号へ変換する間接変換方式が主であるが、直接変換方式(後述)の半導体検出器もある。一次元センサー

図2 X線イメージインテンシファイアの湾曲画像例(BGA画像)³⁾

図3 カラーイメージインテンシファイアの断面構造図(株式会社東芝殿ご提供)

原理図

図4 X線ラインセンサーの概念図(浜松ホトニクス株式会社殿ご提供)⁵⁾

であるが、図4に示すように製品自体がベルトコンベアのような移動するステージに置かれ、ラインセンサーと検査対象物が相対的に移動され、画像データの収集を行う。

画像はラインセンサーの検出器長さとのステージ移動量の積となる。ステージ移動量は、コンベアのような移動ステージの速度とデータ採取時間の積から求められ、実際のイメージにおけるアスペクト比を求めることになる。

図5 直接及び間接変換方式のフラットパネルディテクタ及びX線イメージインテンシファイアとの比較概説図³⁾

一般には検出器幅が小さい（一次元センサー）であるため、二次元センサーにおける幅方向のクロストークによる散乱光が低減でき、高画質な画像が得られる可能性があるが、工場などでの製品検査に利用されることが主であるため、溶接検査に使用された事例は少ないようである。

3.3 フラットパネルディテクタ

フラットパネルディテクタは前述のラインセンサーが一次元であったのに対し、二次元に配列した平面型半導体デバイスであり、近年になって撮影面積が大きなものも見られるようになった。

原理としては図5に示すように放射線を直接電気信号に変換するタイプ（直接変換方式）と、放射線に対してシンチレータを介してX線像を光に変換し電気信号に変換するタイプ（間接変換方式）の2通りがある。

一般に直接変換方式は、間接変換方式のように光を介することなく画像化できるため、高解像度である言われている。

このようにフラットパネルディテクタは、2次元センサーであり面情報が得られることから、従来のX線フィルムの代替えとしての使用用途への期待から、微小きず検出などの要望が高まり、高感度化及び高解像度化を図った研究・開発活動が盛んである。

前述のイメージインテンシファイアでの画像にじみや焼き付きといった諸問題を飛躍的に改善し、解像度を高めたX線検出器が開発され、商品化されている。

現場での撮影においては、名前の通り、フラットパネルであるため、X線フィルムのような管の曲率に曲げて使用することなどはできないが、リアルタイム性を生かした、イメージインテンシファイアの透視法としての動画及び高画質な静止画像が撮影できる技術であるといえる。

3.4 コンピューティドラジオグラフィ (Computed Radiography, CR) システム

放射線像を輝尽性蛍光体（イメージングプレート）に取り込んだ後、イメージングプレートをレーザ光で走査し、その際に発生する光をフォトダイオードなどの光センサ

図6 フィルムデジタイザー装置の一例（GE センシング&インスペクション・テクノロジーズ株式会社提供⁶⁾）

によって電気信号に変換し、デジタル画像を得る手法である。

CRシステムは富士フィルムが1983年にFCR（Fuji Computed Radiography）の名称で発売したもので、X線フィルムに代わって輝尽性蛍光体シートを用い、撮影後レーザ照射によりX線画像データを読み取り、出力画像はディスプレイに出力される。輝尽性蛍光体シートは像を消去した後、繰り返し撮影に使うことができる。これにより、消耗品としてのX線フィルムが不要になり、その処理のための化学的な薬品やプロセスが不要となった。本システムは従来法を一変させる画期的発明として登場した。CRシステムはその後、富士フィルムに続き、世界各国の写真フィルムメーカーからも販売されている。

3.5 その他

画像のデジタル化技術の普及に沿って、従来X線写真フィルムで撮影されたものを、そのままデジタル化し、コンピュータに取り込み、電子ファイルとして保存する方法としてフィルムデジタイジング法がある。図6に示すような装置にX線フィルムをスキャンさせて使用する。

例えば、プラントで建設時に撮影したX線フィルムを保存し、メンテナンス時に照合させたりする場合がある。そ

うしたフィルムは膨大であり、かつ適切な環境にて保管する必要があるため、保管スペース及びその維持費のコストが負担となっている。

このような目的においてX線フィルムをデジタル化できることは、非常に有意であり、そのためにフィルムデジタイジング法への期待は大きい。

また、X線フィルムの保管の改善以外にも、当然前述したように、X線フィルムでは適用できない画像処理がフィルムデジタイジングすることにより可能であり、検査員による観察や顧客への報告資料として視認性を上げることが可能である。

その際、問題となるのは、デジタイジングした画像がどこまで忠実に原画像であるX線フィルムを再現できるかであり、分解能を決めるスキャンピッチや読み取り可能な濃度範囲などが重要な特性になってくる。

海外では、X線フィルムのようにクラス分類があり、それに応じて必要な分解能などが規定されている。

4. 適用事例及び応用展開

前章で数々のデジタルラジオグラフィ技術について紹介した。この中で、現在フィールドで数多くの適用実績があるものとしてCRシステムが挙げられる。

イメージングプレートはX線フィルムと同形状の撮影デバイスで、フィールド検査や狭隘な空間での撮影にも適している。実機検査では、現地での撮影後、イメージングプレートの読取装置を設置している場所に撮影済みイメージングプレートを持ち込んで処理を行っている。

このため、検査の結果が撮影後、すぐに分からず現地で処理可能な可搬式装置の開発が望まれていた。現地撮影におけるイメージングプレートの読取処理を実現するために、これらを搭載した図7に示すようなCRシステム車を製作し、同システムの全国展開を視野に入れ、車載化へのフィジビリティスタディを経て、現在においては、複数台からなる車載式CRシステムがあり、放射線撮影後現場で直ちに検査結果を知ることができるものとなった。

現在、CRシステムの検査の多くは、減肉調査・スケール調査が占める。近年、検査対象物によっては、従来のフィルム法にとってかわりデジタルラジオグラフィを用いた手法が大きなウェイトを占めるようになってきた。

溶接検査でデジタルラジオグラフィが用いるためには、微細なきずの検出が必要であるため、特に分解能が必要であり、X線フィルム並みに改善することができればいいが、現状そのレベルではない。

この問題を解決する一方法として微小焦点（マイクロフォーカス）X線による拡大撮影が挙げられる。図8に示すように、検査対象物を線源に近づけて、検出器を離れた位置に配置することによって拡大した画像が得られる。通常、工業用X線装置やガンマ線源の寸法は2~3mmオーダーであり、拡大撮影するとボケが生じるため検査対象物に密着させて撮影することがほとんどであるが、X線の焦点を小さくすることで、ボケのない鮮明な画像を得ることが可能である。

図7 車載型 FCR システム

図8 拡大撮影方法

図9 後方散乱X線装置の概要^③

実際においても、様々なところで検討されており、例えば、発電用ガスタービンの燃焼器、燃焼器の溶接において、フラットパネル検出器と小焦点線源の組合せで従来のフィルム撮影と同等以上の欠陥検出を可能とした事例^⑦も発表されている。

また、デジタルラジオグラフィで用いている検出器を利用した応用システムがある。

一つは病院などで広く用いられているコンピュータ断層撮影（Computed Tomography, CT）と呼ばれて3D画像としてなじみのある手法である。

これは対象物を回転させながら（または、X線源と検出器を対として対象物を中心として回転させる）、前述した各種デジタルデバイスを介して得られた二次元画像を立体画像として再合成し、必要な個所のスライス画像を信号

处理的に合成する手法である。

また、単なる断層画像にとどまることなく、蓄積したデータをボリュームレンダリングすることにより、立体的な画像の表示が可能で、目的の部位に合わせてヒストグラムの調整や画像処理技術を行い、リバースエンジニアリング手法にも利用されている。

デジタル化してコンピュータを応用した画像処理が行われるようになったとはいえ、放射線透過試験において最終的に超えられない問題点は透過法であること、すなわち超音波探傷試験のような片面からの検査ができないことである。この問題点を解消するため、試験体にX線を照射して、コンプトン散乱（反射）する放射線を検出する方法が従来から検討されてきたが、この方法で透過写真と同様な結果を得るためには、散乱X線の方向を特定して検出する必要がある。最近米国で開発され既に実用化された後方散乱X線装置の概要を図9に示す。図中の右側から細く絞ったX線ビームを左側にある試験体に対して扇形上にスキャンして照射させ、それぞれのビームの位置で散乱したX線を中央のBの位置にある検出器で散乱方向を特定して検出する。この結果、照射した断面に対して散乱X線の強度分布から線状の画像データが得られ、この装置全体又は試験体を直角方向に動かすことにより、二次元的な平面画像を構築することができる。この装置の場合は、図の左端のAの位置に透過した放射線を検出する機能も備えており、透過写真画像が同時に得られる。

後方散乱X線のもう一つの特長は、樹脂などの原子番号の小さい物質に特異的に反応するため、爆発物、プラスチック、麻薬など従来の透過法では検出できなかった物体を高いコントラストで画像化できることである。最近、刃物や拳銃などの金属部を樹脂に置き換えて製造することにより、従来のX線検査から逃れようとする犯罪が見られるが、このような場合に非常に有効な方法である。この方法は主にテロ対策などのセキュリティ分野で注目され、現在米国の政府や軍事機関、あるいは空港での荷物検査などに用いられている。

5. 現状の課題（規格化の動向^{8, 9)}）

これまでに様々なデジタルラジオグラフィシステムについてご紹介してきたが、病院におけるデジタル化は非常に進んでおり、もうほとんどの施設においてはデジタル化されたと言えるが、非破壊検査分野におけるデジタル化の動きは、医療分野のそれとは異なり、その伸びが鈍いと言える。

この要因としては、JIS規格、強制法規などでその使用が認められていないことにあると考えられる。X線フィルムに比べ、分解能や作業コストの面で劣るが、デジタルの特性である画像処理、計測及び保存の利便性を考えた場合、適用対象又は目的によってはデジタルラジオグラフィが有意な場合も多々あり、利用推進高まってきている。

国内の放射線透過試験に関する規格はフィルム法に規定したものであり、これらをそのままデジタル法に適用することはできない。そのため、国内では、既存のフィルム法の規格にデジタル撮影法を附属書として採用できない

か検討されている。さらに日本溶接協会の非破壊試験技術実用化研究委員会（大岡紀一委員長）において、フィルムのデジタイジングなどの試験、研究が行われていると聞いている。

一方、欧米ではデジタル法について多くの規格がすでに制定されており、我が国でもこれらの規格を参考にしてデジタル法に関する規格を整備し、同技術の普及を促進する必要がある。

デジタルラジオグラフィは、アメリカでASTM E1000 “Standard Guide for Radioscopy” として1992年に規格化されている。RTとは別に、ラジオスコピーとして位置づけられていた。続いて、1996年にE 1255 “Practice for Radioscopy” が制定されて、実用化されている。実際にはASME sec. Vには、Article 2のMandatory Appendixとして、II—Real Time Radioscopic Examination, III—Digital Image Acquisition, Display, and Storage for Radiography and Radioscopy, IV—Interpretation, Evaluation, and Disposition of Radiographic and Radioscopic Examination Test Results Produced by the Digital Image Acquisition and Display Process—として組み込まれており、活用されている。

ヨーロッパでは、EN 13068-1 “Radioscopic testing part 1 Quantative measurement of imaging properties”, EN 13068-2 “Part 2 Check of long term stability of imaging device”, EN 13068-3 “Part 3 General principles of radioscopic testing of metallic materials by X-and gamma rays” が1999年より順次制定されている。さらに、CRシステムを用いた放射線透過試験に関する欧州規格としてEN14784-1及び-2が2005年に制定された。EN14784-1ではCRシステムの画質レベルを分類する方法の定義と性能管理方法を規定し、EN14784-2ではCRシステムを金属材料の放射線透過試験に適用するための要求事項を規定している。EN14784-1に対応するISO規格としてISO16371-1が2011年に制定された。また、EN14784-2に対応するISO規格としてISO16371-2が提案され、審議が開始されている。

さらに、CRシステム及びDDAシステムを用いたデジタル撮影法による溶接継手の放射線透過試験について規定したISO17636-2がFDISとして審議中である。

従来ISO規格はEN規格制定後に提案され、制定されてきたが、一方、ISO17636-2は対応するEN規格が制定されずにISO規格案として提案されており、工業分野へのデジタル撮影技術の普及に対する要望が大きいことが伺える。

国内では、NDIS 1403が1999年に制定されているが、JIS規格としての制定はされていない。

今後とも関連する使用者、装置メーカーなどの協力を得ながら、関連学協会等との連携を取って、国内での規格への対応を早急に推進する必要がある。

6. ま と め

本報では、デジタルラジオグラフィによる特徴、種類、適用事例及び現状の課題について概説した。今後ともハードウェアの開発もさることながら、規格制定もなされ、これまで以上にデジタルラジオグラフィが各種検査に用いら

れる一手段として広く使われることと確信する。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会,「放射線透過試験Ⅲ」,日本非破壊検査協会,(2002),pp.79-100.
- 2) 東芝電子管デバイス株式会社,イメージインテンシファイア技術資料.
- 3) 松田淳,「デジタル X 線非破壊検査技術」,J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 54, No. 1 (2011), pp.13-20.
- 4) 日塔光一,「カラー I.I. で広がる新しい検査技術」,非破壊検査., Vol. 58, No. 12 (2009), pp.520-524.
- 5) 浜松ホトニクス株式会社ホームページ, <http://jp.hamamatsu.com/index.html>
- 6) GE センシング&インスペクション・テクノロジーズ株式会社ホームページ, <http://ge-mcs.jp/it/index.html>
- 7) 木屋敦詞,田中亮,八木尚人,郡佳伸,「燃焼器の溶接部位に対するデジタルラジオグラフィの適用」,第8回放射線による非破壊評価シンポジウム講演論文集,(2012), pp.57-58.
- 8) 藤岡和俊,大岡紀一,「デジタル放射線透過試験の現状について」,第6回日本非破壊検査工業会技術討論会討論概要集,(2010), pp.55-65.
- 9) 脇部康彦,加藤潔,稲見隆,釜田敏光,窪田聡,谷口良一,柏俊文,藤岡和俊,大岡紀一,「ISO17636-2 規格紹介と今後について」,第8回放射線による非破壊評価シンポジウム講演論文集,(2012), pp.73-78.