

工場分野（横浜検査部）の「売りの技術」

1. 放射線透過試験のデジタル化に関する取組み

横浜検査部は IHI 横浜事業所の各工場および関係会社の検査業務、また発電プラント・化学プラント・橋梁・環境関係等の検査工事を担当している。検査技術としては浸透探傷検査（PT:Penetrant Testing）、磁粉探傷検査（MT:Magnetic Particle Testing）、超音波探傷検査（UT:Ultrasonic Testing）、放射線探傷検査（RT:Radiographic Testing）、渦流探傷検査（ET:Eddy Current Testing）を有しており、あらゆる非破壊検査に対応できるようにしている。その中でも当部は放射線検査を主力としており、昭和 40 年代の初めから産業用高エネルギー X 線装置や放射性同位元素等を導入し国内原子力機器等の発電プラントに関する放射線透過試験（RT）を実施してきた。また、外部の会社からも RT を積極的に取り込んでおり、全国から铸造品を含むさまざまな製品の RT を受注している。

国内デジタルラジオグラフィ（DR）の規格は 2017 年 9 月に JIS Z 3110「溶接継手の放射線透過試験方法—デジタル検出器による X 線及び γ 線撮影技術」⁽¹⁾として発行された。これにより、今後はデジタル RT（D-RT）の普及が進み、フィルムに代わる検出器を使用した RT が少しずつ増えてくると考えられる。これら D-RT は、規格化される以前から当社では D-RT 設備を導入し、社内検査および現地配管の減肉調査等に使用していた。また、写真 1、写真 2 に示すように高エネルギー X 線を使用し、フィルム RT（F-RT）による原子炉压力容器や各種プラントのバルブ等の RT 検査では材厚 400mm までの検査ノウハウを蓄積していることから、厚板材に対しての DR 適用の検討を実施している⁽²⁾。

また、現地配管の RT においては、従来は放射性同位元素を使うガンマ線透過写真撮影を実施しているが、事前手続きおよび準備に時間がかかる等の課題点があった。そこで、小型 X 線装置と DR とを組み合わせることで工事の省力化を図ることの検討を実施している。以上の検討課題に対し、社内の DR 機材を使用して従来の F-RT とコンピュータラジオグラフィ（CR）（イメージングプレート:IP）および平板型半導体検出器（デジタルディテクタアレイ:DDA）など、DR 適用の取組みおよびその他 DR に関する活動等について紹介する。



写真 1 原子炉压力容器



写真 2 大型バルブの RT

1.1 高エネルギー X 線による DR の適用

高エネルギー X 線による DR の適用として、高エネルギー X 線を使用し厚肉材に対し、従来の F-RT と同様に DR が可能かの確認検討を実施した⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

(1) 試験の状況

写真 3 は、溶接試験片 t38mm に SM490A 鋼板を取り付け、78mm の試験体厚さとし 9MeV 直線加速器での撮影状況を示す。

また、材厚 78mm のタングステン球入り鋼板⁽⁶⁾は、9MeV のエネルギーに対して比較的板厚が薄いためコントラストを得るには厳しいため、DDA を保護するために撮像領域の周りにある電気回路を厚さ 50mm の鉛ブロックでシールド保護を施した。



写真 3 高エネルギー X 線照射装置の撮影配置

(2) 像質計の配置と評価

ISO 17636-2 に基づき計算された空間分解能は、ワイヤ対の分解能を示しており、画像処理ソフトウェアはドイツ連邦材料研究所 (BAM) の ISee! ver.1.10.2⁽⁷⁾ を使用して画像の解像度を評価した。写真 4 に各像質計 (イメージクオリティインジケータ: IQI)⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾ の配置を示す。

本試験では厚い材料の試験条件でも全てフィルムを基準として同等に比較するため IQI⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ は全て線源側に適用して試験した。



写真 4 各像質計 (IQI) の配置

(3) 9MeV の撮影画像

写真 5 ~ 写真 7 は、9MeV で高エネルギー X 線を用いたフィルム、IP および DDA の放射線画像をそれぞれ示す。DDA の撮影過程における積算処理は、従来のフィルム像とは異なるコントラストが得られる。フィルムと DDA による撮影画像は、DW、JIS 線形タイプの透過率計、ASTM の有孔形タイプの透過率計とも比較的明瞭であったが、IP の撮影画像では散乱線による影響か画像が不均一で少し不明瞭となる結果であった。

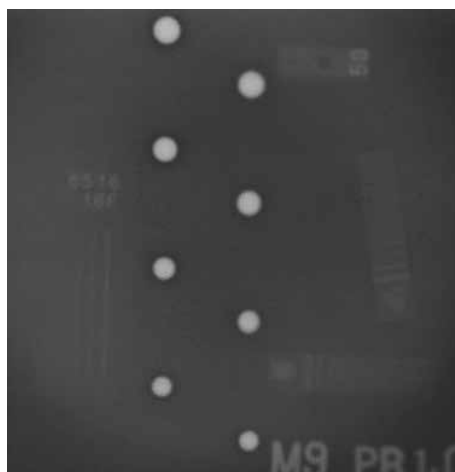


写真 5 9MeV のフィルム画像

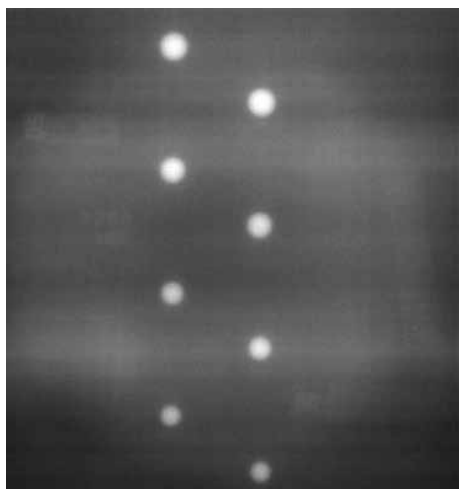


写真6 9MeVのIP画像

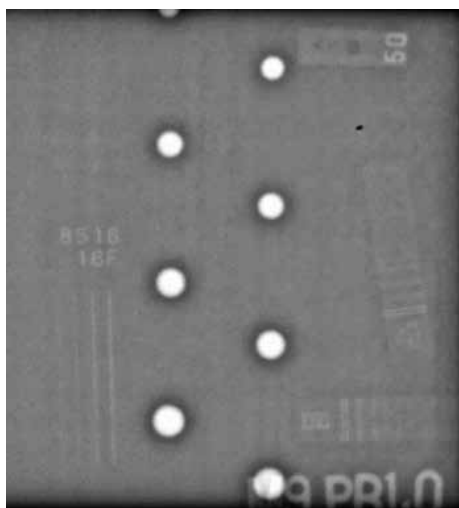


写真7 9MeVのDDA画像

(4) 複線形像質計 (DW) による空間分解能の測定結果

図1は、300keV、950keV および9MeVのX線エネルギーを用いたフィルム、DDA およびIPの空間分解能の比較をした際の例として950keVのグラフを示す。300keVと950keVの空間分解能はフィルム、IP、A社のDDA、B社のDDAの順で良好であり同様の弧を描くようなグラフを得られた。9MeVでは安定しておらず、グラフの勾配は同様とはならなかった。最小のワイヤ対の空間分解能が明ら

かに劣っていた。これは、DW⁽¹³⁾の使用についてはエネルギー600keV以上での使用は適切ではないというデータがあり、試験でも9MeVでは当然の結果を得られたことになる。ただし、1MeV付近⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾まではおおむね安定しており、参考にしても良いのではないと思われる。DDAは、複数の画像を使用する積算処理のために、フィルムやIPよりも優れたCNR(コントラスト対ノイズ比)の画像を生成する機能(ソフトウェア)を備えており、本試験では画像処理を少し強めにかけている。

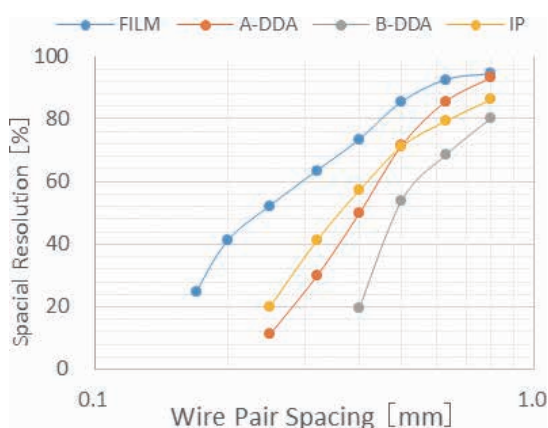


図1 空間分解能フィルム/DDA/IP : 950keV

(5) 鋳物を模したさらなる厚肉材へのDR適用

厚肉のX線撮影検査では、DDAと2種類のIP(主に高分解能タイプ)を使用した。この試験におけるX線撮影の対象は、高エネルギーX線の領域で鋳造品を模擬した102mmと240mmおよび300mmの厚いプレートを用いた。高エネルギーを適用したDDA/IPの画像を従来のフィルムと比較するためフィルムは高分解能タイプを使用して撮影を試みた。

厚肉試験体の撮影画像240mmと300mmについて、各撮影媒体の画像を写真8~写真13に示す。また、鋳物を模した厚肉材へのDR適用について検討した結果、以下のことがわかった。

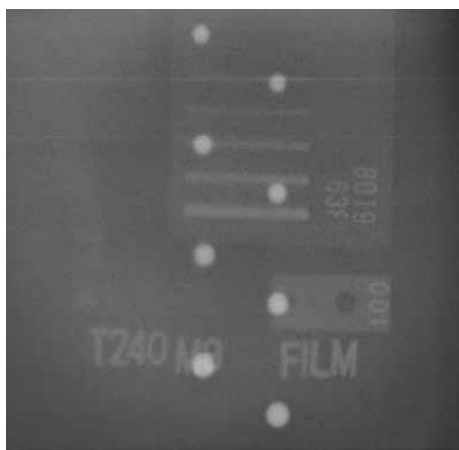


写真 8 t240mm フィルム画像

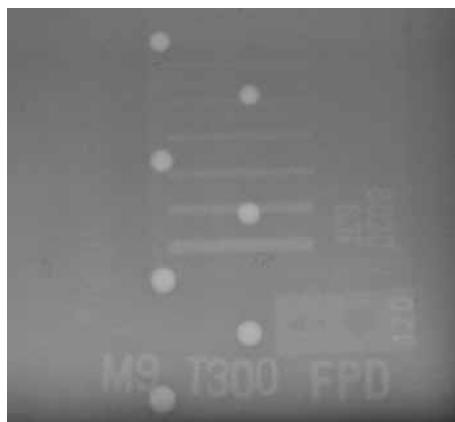


写真 11 t300mm のフィルム画像 (マークミス)

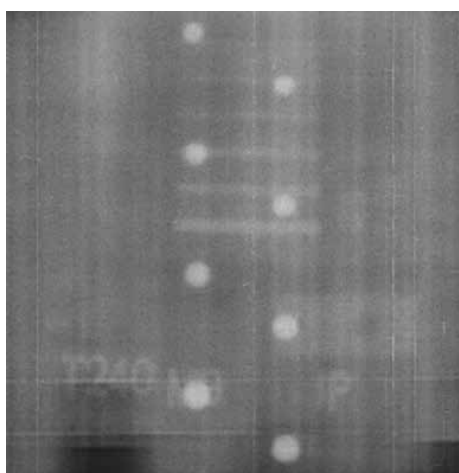


写真 9 t240mm IP 画像

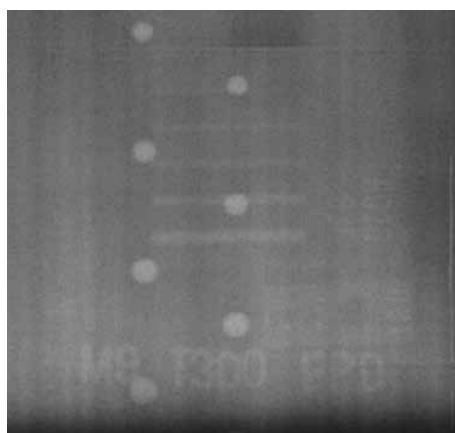


写真 12 t300mm の IP 画像 (マークミス)



写真 10 t240mm の DDA 画像

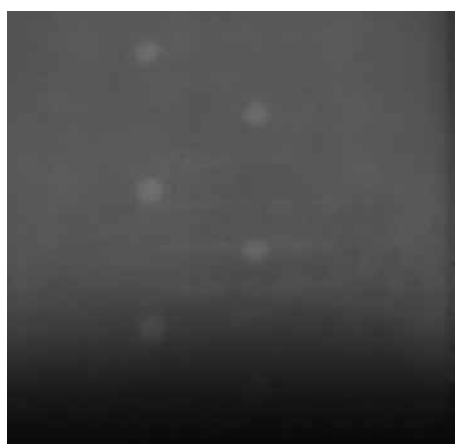


写真 13 t300mm の DDA 画像

- ①材厚 300mm までの試験において ASME 有孔形 IQI は IP、DDA において規格要求を満たすことがわかった。
- ②300mm より厚い試験片での DDA の透過画像は、積分処理を含めると 30 分以上の長い照射時間が必要となることが判明した。超高精細 IP を厚い試験片に初めて適用した結果、予期せず DDA よりも短時間である程度の画質が得られることがわかった。
- ③線形 IQI（線源側）は材厚が 300mm では規格要求を満足しない。
- ④DW はフィルムとの比較を考慮して線源側に置いていたがほぼ満足していない。今後の課題として撮影媒体側に入れて試験をする必要がある。表 1 に IQI の識別結果をまとめた。

1.2 現地配管への DR 適用

狭隘部の現地配管の RT は、従来、ガンマ線を使用した F-RT が実施されている。近年は、小型軽量の X 線装置が登場したこともあり、高精細デジタルデバイスとの組合せによる DR 適用について検討した。ここでは、現地配管等の RT 検査に関する基礎データを取得し、従来の品質を維持した上で作業の省力化とコストダウンを目指した。また、業容拡大および実工事に向けた検討を実施している。

(1) 検討方法

DR として DDA と IP を使用し、狭隘部の現地配管等を撮影することを想定し特殊な小型 X 線装置を用いて従来の検査と比較して規格上問題のない像質を得ることができるか比較した。撮影距離は 200 ～ 250mm とした。

表 1 高エネルギー X 線による IQI の識別結果

フィルムによる IQI の識別：規格の識別要求値

Thickness (mm)	ISO19232-5/JIS Z 2307	JIS Z 2306 Wire Type	ASME/ASTM E1025 Hole Type
102	D6	1.25mm (W5)	2T (X60)
240	D5	2.00mm (W3)	2T (X100)
300	D4	2.00mm (W3)	2T (X120)

フィルムによる IQI の識別結果：試験の識別値

Thickness (mm)	ISO19232-5/JIS Z 2307	JIS Z 2306 Wire Type	ASME/ASTM E1025 Hole Type
102	D6	1.25mm (W5)	2T (X60)
240	D5	2.00mm (W3)	2T (X100)
300	D4	2.00mm (W3)	2T (X120)

IP による IQI の識別結果（高分解能タイプ 102mm 300mm）

Thickness (mm)	ISO19232-5/JIS Z 2307	JIS Z 2306 Wire Type	ASME/ASTM E1025 Hole Type
102	D6	1.25mm (W5)	2T (X60)
240	D5	2.00mm (W3)	2T (X100)
300	D4	2.00mm (W3)	2T (X120)

DDA による IQI の識別結果

Thickness (mm)	ISO19232-5/JIS Z 2307	JIS Z 2306 Wire Type	ASME/ASTM E1025 Hole Type
102	D6	1.25mm (W5)	2T (X60)
240	D5	2.00mm (W3)	2T (X100)
300	D4	2.00mm (W3)	2T (X120)

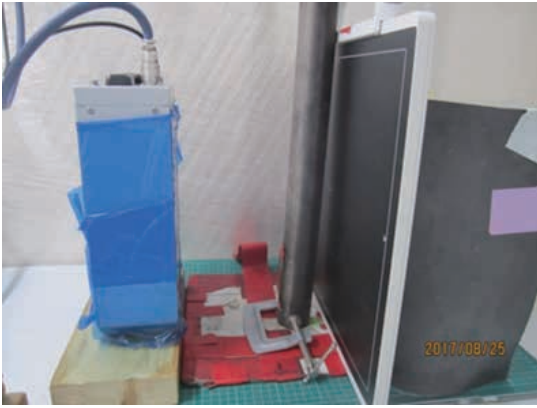


写真 14 配管の撮影配置

(2) 撮影結果 (DDA の例)

以下に DDA のみ画像を示す。

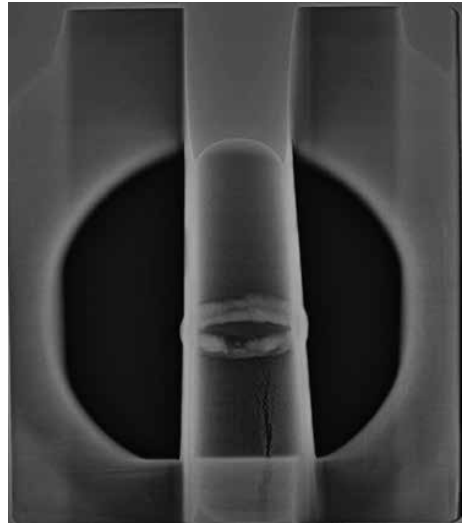


写真 17 B 社 X 線装置 高精細 IP 20 秒

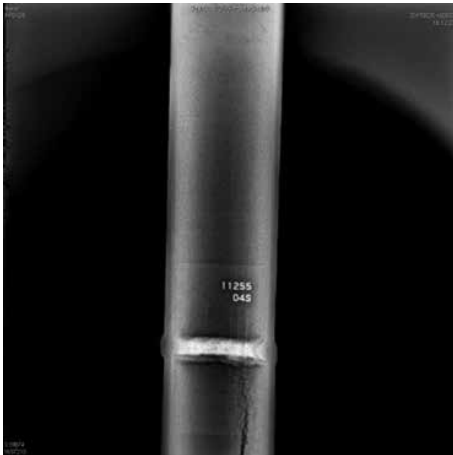


写真 15 A 社 X 線装置 0.4 秒 × 4 回積算

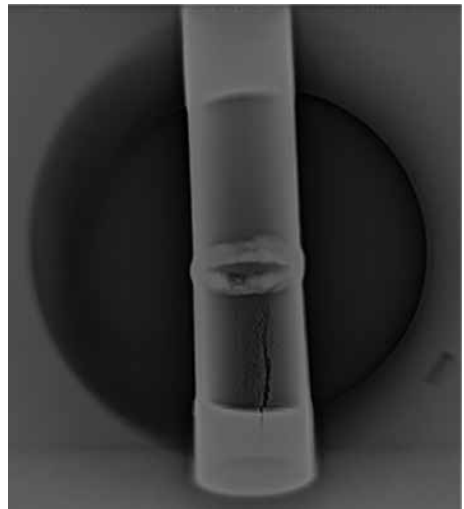


写真 18 B 社 X 線装置 フィルム 25 秒

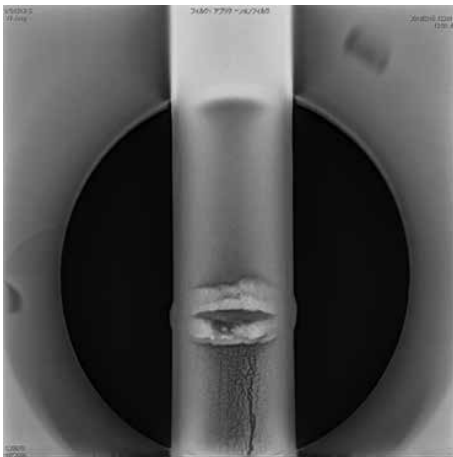


写真 16 B 社 X 線装置 DDA0.5 秒 × 20 回積算

(3) 検討結果

A 社製小型 X 線装置での結果を写真 15 に示すが、パルス出力タイプで連続照射時間が 2 秒という仕様のため、IP やフィルムでは照射回数を重ねることで必要な線量を照射可能となる。感度の違いにより高感度 IP で 20 秒、高精細 IP で 50 秒の露出時間で撮影できることがわかった。しかし、照射を何度も繰り返す手間は作業負担となり、撮影条件を探る上でも苦勞することとなった。一方、DDA は照

射中積算処理をして画像を構成するため照射時間が短いと積算回数も制限され、さらに X 線装置と DDA の同期が難しくなる。試験では 1 フレーム 0.4 秒で 4 フレームを積算したものと 1 フレーム 1.6 秒のみとを比較してみた。像質はほぼ違いはないが照射時間を増やした方がコントラストは比較的高くノイズは 4 フレーム積算した画像の方が少ない感じとなった。実撮影では 1.6 秒 1 フレーム撮影でも問題ないと思われる。いずれにしても連続照射時間が 2 秒というのは使いにくさを感じた。

メーカーでは将来的に 8 秒くらいまで連続照射できるよう改良するとの話があったが、現場で使用するにはそれでも短く、高感度の DDA で使用するには良いが、その他のデバイス（撮影媒体）には制約の生じる場合もあると考えられる。

一方、B 社の小型 X 線装置での撮影結果を写真 16～写真 18 に示すが、コンスタントポテンシャルの連続照射が可能で、エネルギーは 120kV と低くアルミなどの軽合金が対象で採用するつもりはなかった。しかし、撮影画像は非常に良好な結果を得ることができた。

本装置はコンスタントポテンシャルということで半波整流や全波整流よりも効率がよく、かつ焦点寸法が 0.5mm と小さく高鮮鋭である。また照射距離がボイラ配管などでは特殊な狭隘環境で 200mm 程度と短いことが幸いして照射線量率を稼げている。像質は規格に基づく配置ができなくてもかかわらず、幾何学的不鮮鋭（ボケ）が少なく鮮明であった。さらにボイラ配管で材厚の厚い 8mm の配管を模擬配管として撮影したところフィルム撮影で良好な

結果を得ることができた。当然デジタル RT であればさらに短い露出時間で撮影が可能となる。

像質計の値からも各配管に対して規格値より小さいワイヤを識別しており十分に透過度計の識別度を満足していることがわかった。

また、従来の ¹⁹²Ir 線源からこれらの小型 X 線装置に置換えることで放射性同位元素の保管・使用届出申請など取扱にかかわる管理コストも大幅に削減が可能である。

1.3 今後の取組み

現在、高エネルギー X 線への D-RT 適用の期待が高まり、さまざまな試験撮影の検討依頼を受けている。1MeV を超える際の DW の取扱はエネルギーと線材の吸収係数や材厚の増加による線源側配置による散乱線の影響などがあり、検出自体に困難があると思われる。今後はディテクタ側配置と補正計算等の工夫が必要と考える。また検出装置システムとして認証されている装置の使用など改善をしつつ、400mm 程度までの鋼材について試験をしておく必要がある。さらに、散乱線除去の物理フィルタや遮蔽の工夫など厚肉撮影に欠かせない技術についても調査が必要と感じている。DDA はフィルムとは異なり、現像プロセスがないことから利便性が非常に高い。また、小型マイクロフォーカス X 線装置と組合せることにより、高精細な検査が可能となると同時に、現地出張工事への適用も可能となる。今後もさらに実証試験を重ね、積極的に適用範囲をひろげたいと考えている。

1.4 委員会活動

当部では、放射線検査部門の活動も積極的に実施しており、写真 19 に示すように、外部の関連業界が参加する専門委員会を通じて規格原案作成委員会等への参与や国内外への技術発表⁽¹⁴⁾および

表 2 現地配管撮影試験の JIS 像質計識別

材厚 [mm]	JIS 規格値 [mm]	識別本数 [本目]	最少識別 線径[mm]
3.7	0.25	4	0.20
8.0	0.40	7	0.20



写真 19 APCNDT2017 技術発表

DR 講習会⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾への講師派遣なども行っている。また、長年に渡り放射線源取扱等の安全管理委員会への参加もしており積極的な技術力強化と品質維持および放射線にかかわる安全管理（法令遵守等）に努めている。

文責

検査事業部 横浜検査部 次長 田北 雅彦

参考文献

- (1) JIS Z 3110 : 2017 : 溶接継手の放射線透過試験方法—デジタル検出器による X 線及び γ 線撮影技術、一般財団法人日本規格協会
- (2) 田北雅彦、中村敬治、佐藤雅保、細谷昌厚: 高エネルギー X 線を用いた平板型半導体検出器のきず検出基本性能確認、IIC REVIEW、No.51、2014/04、pp.31-38
- (3) Y. Narukawa : The Latest Computed Radiography. Non-destructive Test, 61 (4), 2012, pp.141–147
- (4) K. LaCivita : Use of Digital Radiography for Final Part Acceptance of Aerospace Castings, Materials Evaluations, 70 (8), pp.915–922
- (5) U. Ewert et al. : Image Quality in Digital Industrial Radiography, Materials Evaluations, 70 (8), 2012, pp.955–964
- (6) Patent No. 5126915 : Method of producing welding test pieces for non-destructive tests
- (7) http://www.bam.de/en/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_8/fg83/fg83_ag5.htm
- (8) BS EN 465-2 : 1996 : Non-destructive testing- Image quality of radiographs Part 5. Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value, BSI, 1996
- (9) JIS Z 2306 : 2015 : 放射線透過試験用透過度計、一般財団法人日本規格協会
- (10) JIS Z 2307 : 2017 : 放射線透過試験用複線型像質計による像の不鮮鋭度の決定、一般財団法人日本規格協会
- (11) ISO 17636-2 : 2013 : Non-destructive testing of welds-Radiographic testing- Part2 : X- and gamma-ray techniques with digital detectors, International Organization for Standardization, 2013
- (12) JIS Z 3104 : 1995 : 鋼溶接部継手の放射線透過試験方法、一般財団法人日本規格協会
- (13) K. Bavendiek et al. : Best Energy Selection for Different Applications with Digital Detector Array from 20 to 600keV, Materials Evaluations, 70 (8), 2012, pp.965–974
- (14) N. Ooka, M. Takita, K. Yokota : Application of Digital Radiographic Testing Techniques to Thick Material using High-energy X-Ray, 15th APCNDT 2017, Singapore
- (15) 日本工業出版株式会社 : 産業用高エネルギー X 線による厚肉材へのデジタル RT の適用 講師 : IHI 検査計測 田北、日工セミナー 2018.3.8 放射線透過法による検査の最新事例 セミナー冊子、pp.46-50
- (16) The Japan Welding Engineering Society : Non-destructive Test Application Research Committee : Basics and Applications of Digital Radiography in Industrial Fields, 2014