

# デジタルラジオグラフィ法の配管検査への 適用基礎研究

田北 雅彦<sup>\*1</sup> 佐藤 雅保<sup>\*2</sup> 細谷 昌厚<sup>\*3</sup>  
*Takita Masahiro Sato Masayoshi Hosoya Masaatsu*

デジタルラジオグラフィ（DR）の中でイメージングプレート（IP）によるコンピューティドラジオグラフィ（CR）技術は当社でも十数年前より製造現場や現地配管の検査で使用実績があった。

近年、工業用 X 線フィルムの入手がますます困難となってきた一方で、平板型半導体検出器（フラットパネルディテクタ：FPD）の性能は著しく向上している。FPD による放射線透過試験の現地工事を想定した場合、環境負荷の低減や省力化を実現できるため検査コストの削減が可能となる。そこで、本試験では FPD による実工事を想定して、配管のきず検出性能を工業用 X 線フィルムおよび IP と比較し、FPD 適用の可能性を確認した。

**キーワード：**放射線透過試験（RT）、コンピューティドラジオグラフィ（CR）、デジタルラジオグラフィ（DR）、イメージングプレート（IP）、平板型半導体検出器（フラットパネルディテクタ：FPD）

## 1. はじめに

放射線透過試験（RT）は、比較的広い面積を一度に可視化でき、内部の状態が容易に視覚的に確認できるため、結果が一目瞭然で誰もが理解しやすい検査方法である。

検出媒体として最も一般的な工業用 X 線フィルム（以下では、フィルムと略す）は、かつての大口需要であった医療分野でデジタル化が急速に進みフィルム材料の需要縮小を招き、X 線フィルム全体の生産体制に影響を与え価格が年々高騰してきている。特に生産量の少ない種類（感度・サイズ）のフィルムでは注文生産となる品目が増えてきている。このため、X 線フィルムを入手するの

に必要な時間が従来より長くなるとともに放射線透過試験の費用増大を招いている。

一方、DR では国内規格化の動きが具体化してきているため当社では、DR が実工事に適用できるかを見極めるべく、配管検査への適用に目し、FPD、CR およびフィルムのそれぞれの撮影を実施して、きず検出性能を比較・検討したので報告する。

## 2. FPD による配管 RT の概要

FPD を使用した実際の現地配管 RT を想定し、溶接きずと減肉（腐食）を模擬した欠陥を付与した鋼管溶接試験片を製作し、きずの検出性能について FPD と他の検出媒体とを比較し、FPD が実

\*1：検査事業部 横浜検査部 課長

\*2：検査事業部 横浜検査部 部長

\*3：技師長

際の検査に使えるかどうかの見極めを行うことにした。

使用する放射線検査機器は 300keV と 950keV の X 線発生装置と 192Ir (イリジウム線源交換時 370GBq) による  $\gamma$ 線照射装置である。また、検出媒体は代表的なメーカー 2 社のシンチレータ GOS タイプの FPD を使用し、フィルムは富士フィルム社製 IX50 高精細フィルムを、IP は同社 ST- VI 高感度タイプを使用した。

なお、FPD システムの構造と特徴、および DR の規格動向並びに技術動向などについては昨年度で報告しているため<sup>(1)</sup>、本稿では省略する。

### 3. 試験片と試験方法

鋼管溶接試験片は外径 165.2mm で肉厚が異なる 3 種類 (JIS G 3459 SUS304TP S-H) TP-1 : t5.6mm、TP-2 : t9.6mm、TP-3 : t16.0mm である。これに内径加工、放電加工 (EDM) 欠陥および溶接施工を行った。完成した試験片の全体図を図 1 に示す。

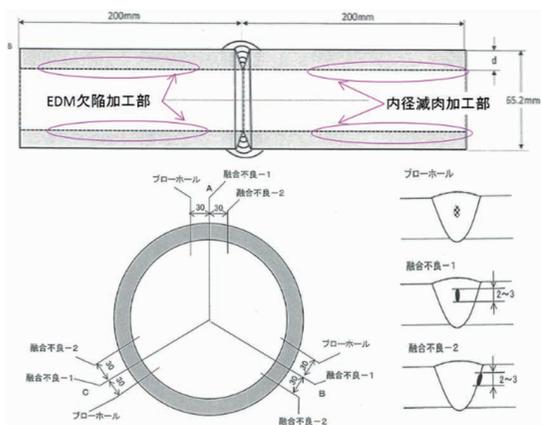


図 1 配管溶接試験片：全体図

減肉は内径加工によって行い、腐食減肉を想定し、各試験片において板厚の 10%、30%、50% となる階段状とした。また、局所的な腐食については Type1 と Type2 の EDM 欠陥を内径に施工した。Type1 欠陥は EDM に用いた電極棒の径を 20mm $\phi$

とし、比較的浅くて大きな局部的腐食を想定している。一方、Type2 は電極棒を 1mm $\phi$  または 2mm $\phi$  と細くし、比較的深くて小さな局部腐食を想定している。EDM 欠陥は図 1 に示すように円筒内面の円弧状表面に加工するので表面からの形状を規定し、加工後、計測することは難しいため、欠陥深さのみ計測することにした。なお、Type1 欠陥は 90° 間隔で軸方向に 10mm 間隔に螺旋状の位置に配置した。また、Type2 欠陥も同様に 90° 間隔で軸方向に 5mm 間隔に螺旋上の位置に配置した。EDM 欠陥の肉厚に対する深さ率は TP-1 : Type1 (9、18、28、45%)、TP-1 : Type2 (20、40、59、98%)、TP-2 : Type1 (5、10、16、26%)、TP-2 : Type2 (19、38、57、95%)、TP-3 : Type1 (7、14、21、34%)、TP-3 : Type2 (11、23、34、57%) である。溶接施工時に融合不良とブローホールを挿入した。目標とした欠陥の挿入位置、欠陥の個数および欠陥のサイズを表 1 に示す。また、図 1 に示すように欠陥導入部位は溶接部円周上、120° 毎に 3 箇所を導入した。

表 1 溶接欠陥挿入位置・個数・サイズ

試験片No.	肉厚	導入部位	欠陥の種類	導入位置	個数	サイズ(mm)
TP-1	5.6mm	A	ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	2
			融合不良-2	BOND	1	2
			ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	5
			融合不良-2	BOND	1	5
		B	ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	8
			融合不良-2	BOND	1	8
TP-2	9.6mm	A	ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	2
			融合不良-2	BOND	1	2
			ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	5
			融合不良-2	BOND	1	5
		B	ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	8
			融合不良-2	BOND	1	8
TP-3	16.0mm	A	ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	2
			融合不良-2	BOND	1	2
			ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	5
			融合不良-2	BOND	1	5
		B	ブローホール	DEPO	数個	<2
			融合不良-1	DEPO中央	1	8
			融合不良-2	BOND	1	8

完成したステンレス鋼管溶接試験片の外観写真を図2に示す。



図2 鋼管溶接試験片の外観（保護付）

撮影条件は基本的に JIS Z 3104<sup>(2)</sup> あるいは ISO 17636-2<sup>(3)</sup> に従って設定し、線源は 300keV 以下と 1MeV の X 線および 192Ir の  $\gamma$  線で各々検出媒体に対し最適の撮影条件を適用するよう工夫した。表2に各放射線および検出媒体ごとの照射条件を示す。

溶接部については図3に示すように FPD の特性を考慮し JIS Z 3104 に基づき二重壁両面撮影法を適用した。溶接部以外の撮影には垂直方向の照射を行った。EDM 欠陥と溶接部についてはあらかじめ、マーキングをして、線源および試験条件を変えた場合でも各試験で同様な照射方向の撮影をできるようにした。ただし、溶接部位について FPD 撮影方向は、反対方向からの撮影画像となっ

表2 各放射線および検出媒体ごとの照射条件

300 keV以下のX線		
SOD	1,000mm	FPD,FILM,IP試験
	溶接部位:照射角度:5° S:14mm	
950 keVのX線		
SOD	1,300mm	FPD試験
	溶接部位:照射角度:5° S:18mm	
	1,000mm	フィルム及びIP試験
	溶接部位:照射角度:5° S:14mm	
192Irの $\gamma$ 線		
SOD	1,000mm	FPD,FILM,IP試験
	500mm(減衰後)	

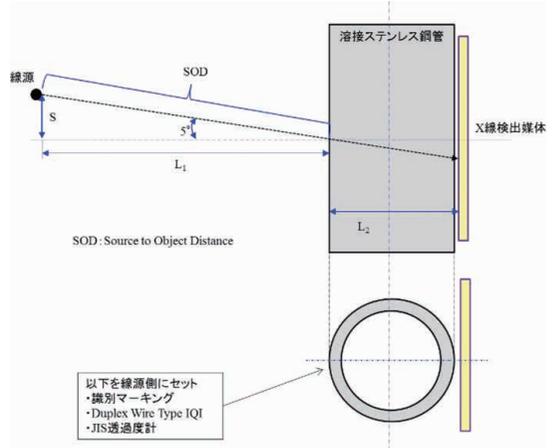


図3 溶接鋼管試験片の撮影配置

ている。撮影分割数は JIS 規格によれば、6 分割撮影が必要であるが、時間の制約もあり、4 分割とした。また、減肉部については 90° 方向 2 分割の撮影とした。

撮影したフィルムと IP 画像はデジタイザーで取り込んだ後、TIFF または DICOM 画像形式として保存した。識別マーキング、Duplex Wire Type IQI (図4)<sup>(4)</sup>、および 08S または 04S の針金透過度計 (図5) を試験毎に撮影領域内に設置した。

針金形透過度計の線径<sup>(5)</sup>および本実験で用いた試験片の材厚に対する識別最小線径<sup>(2)</sup>を表3に示す。

図6に 192Ir  $\gamma$  線による撮影配置の外観を示す。また、図7は配管および検出媒体部分の詳細を示している。直線加速器を用いた 950keV の FPD 試験では検出媒体の電子機器部損傷を防止するために鉛ブロックを用いて十分な遮へいを行った。



Element No. (D=Duplex)	Corresponding unsharpness	Wire Ø and spacing, mm
13D	0,10	0,050
12D	0,13	0,063
11D	0,16	0,080
10D	0,20	0,100
9D	0,26	0,130
8D	0,32	0,160
7D	0,40	0,200
6D	0,50	0,250
5D	0,64	0,320
4D	0,80	0,400
3D	1,00	0,500
2D	1,26	0,630
1D	1,60	0,800

図4 Duplex Wire (複線形像質計)  
(EN462-5:1996)

透過度計 04S



細 0.20 0.25 0.32 0.40 0.50 0.64 0.80 太い  
← 線径

図5 JIS 透過度計 04S

表3 TP材厚に対する識別最小線径

TP-1	材厚: 11.2mm	識別最小線径
		A級: 0.25mm φ
		B級: 0.20mm φ
		P1級: 0.40mm φ
TP-2	材厚: 19.2mm	識別最小線径
		A級: 0.40mm φ
		B級: 0.25mm φ
		P1級: 0.63mm φ
TP-3	材厚: 32.0mm	識別最小線径
		A級: 0.50mm φ
		B級: 0.40mm φ
		P1級: 1.00mm φ
		P2級: -



図6 192Ir: γ線による撮影配置



図7 配管の検出媒体側

#### 4. 試験結果

FPDについて透過度計最小識別線径はいずれもP1級 (P1級: 円周溶接接手の片面を撮影する場合に得られる通常の像質) を満足する結果となり、配管に対する像質は問題のないことが確認できた。本稿では紙面の関係上、最も材厚が厚く難しい条件となるTP-3 (t16mm) についてのみ結果の画像を示すこととする。線源は現場へ持ち運びが可能で実工事に使用が想定されるものとして300keVのX線装置と192Irのγ線を取りあげる。表4、図8～図10と図11～図13に溶接部欠陥の画像を示す。

表 4 溶接欠陥試験結果

試験片No.	線源	エネルギー keV	撮影方向	溶接欠陥の検出個数					
				Film	IP	FPD	Film	IP	FPD
				融合不良			タングステン巻き込み		
TP-3	X線	250/300	1	1	0	2	1	1	1
			2	1	1	2	3	3	3
			3	0	0	1	1	1	1
			4	2	1	2	3	3	4
	γ線	平均450	1	2	0	0	1	1	0
			2	2	2	0	3	3	1
			3	0	0	0	1	1	0
			4	3	1	0	3	1	1
	X線	950	1	3	-	3	1	-	1
			2	3	-	4	3	-	3
			3	3	-	1	1	-	1
			4	3	-	3	3	-	3

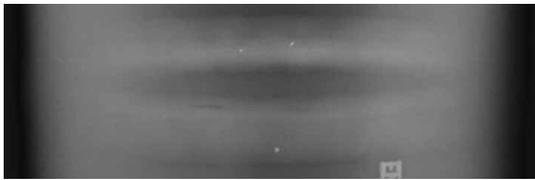


図 8 TP-3 方向 2 (FILM : 300keV 5.0mA 360sec)

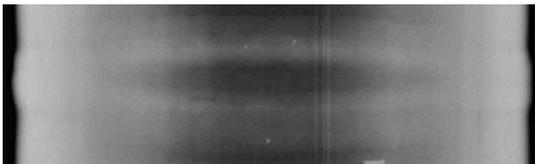


図 9 TP-3 方向 2 (IP : 300keV 5.0mA 30sec)

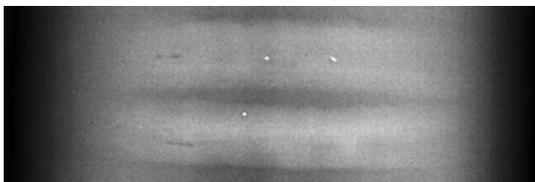


図 10 TP-3 方向 2 (FPD:250keV 3.0mA 5sec 3frames)

X線装置における溶接欠陥の検出では FPD が最も鮮明に欠陥を検出していた。融合不良が他の検出媒体よりも多く捉えられ、積分処理の効果もあり他とはコントラストが違うことがわかる。

ただし、配管の両サイドは他の検出媒体に比べて黒潰れしており、散乱線の影響が大きいことがわかる。

192Ir の撮影ではフィルムが最も像質が良く、FPD では良い結果が得られなかった。

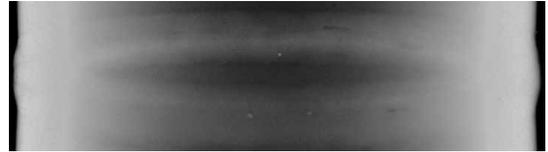


図 11 TP-3 方向 2 (FILM : 192Ir γ線 3,000sec)

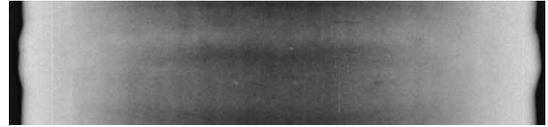


図 12 TP-3 方向 2 (IP : 192Ir γ線 420sec)

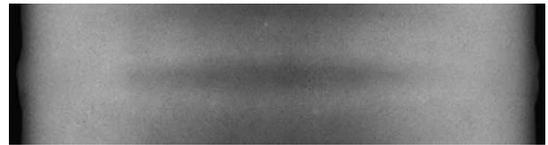


図 13 TP-3 方向 2 (FPD : 192Ir γ線 100sec 3frames)

表 5、表 6、図 14～図 19 に EDM 欠陥および肉厚測定の結果を示す。

表 5 EDM 欠陥試験結果

試験片No.	線源	エネルギー (keV)	撮影方向	検出媒体	EDM欠陥										
					Type 1欠陥				Type 2欠陥						
					A-1	B-1	C-1	D-1	A-2	B-2	C-2	D-2			
TP-3	X線	250/300	1	FPD (GE SIT)	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	
				X線フィルム	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	
				IP	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	
				FPD (GE SIT)	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	
			2	X線フィルム	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
				IP	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
				FPD (GE SIT)	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-
				IP	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-
			3	FPD (GE SIT)	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
				X線フィルム	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-
				IP	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-
				FPD (GE SIT)	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	4	FPD (GE SIT)	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○		
		X線フィルム	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○		
		IP	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○		
		FPD (GE SIT)	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○		
	γ線	450	1	FPD (GE SIT)	-	○	-	○	-	×	-	×	-	×	
				X線フィルム	-	○	-	○	-	○	-	×	-	×	
				IP	-	○	-	○	-	○	-	○	-	×	
				FPD (GE SIT)	○	-	○	-	×	-	○	-	○	-	
			2	X線フィルム	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
				IP	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
				FPD (GE SIT)	-	○	-	○	-	×	-	×	-	○	
				IP	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	
3			FPD (GE SIT)	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	
			X線フィルム	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	
			IP	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	
			FPD (GE SIT)	○	-	○	-	×	-	×	-	○	-	○	
4	FPD (GE SIT)	○	-	○	-	×	-	×	-	○	-	○			
	X線フィルム	○	-	○	-	×	-	×	-	○	-	○			
	IP	○	-	○	-	×	-	×	-	○	-	○			
	FPD (GE SIT)	○	-	○	-	×	-	×	-	○	-	○			

(注記) 「○」印: 検出可、「×」印: 検出不可あるいは撮領域外  
「-」印: 対象外あるいは試験未実施

表 6 肉厚測定の可能性評価

試験片No	線源	入射 エネルギー	照射 方向	肉厚評価の可能性			
				FPD (GE SIT)	FPD (PKE )	Film	IP
TP-3	X線	250/300	1	×	×	×	×
			2	×	×	×	×
		950	1	○	○	○	—
			2	○	○	○	—
	γ線	450	1	×	—	○	○
			2	—	—	○	○

(注記) 「—」印：試験未実施、「○」印：内径面の識別が可能なので肉厚測定は可能と評価

「×」印：内径面の識別ができていないので肉厚測定の可能性は無と評価



図 14 FILM : 300keV



図 15 IP : 300keV

各検出媒体で EDM 欠陥を良好に検出しており濃度から全体の減肉を推定できる。

減肉を壁厚から計測しようとする場合は、IP が最も配管壁厚を検出できることがわかった。

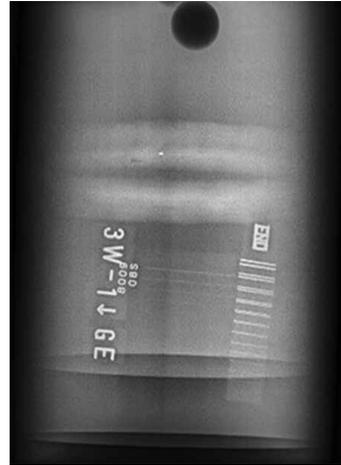


図 16 FPD : 300keV



図 17 FILM : 192Ir

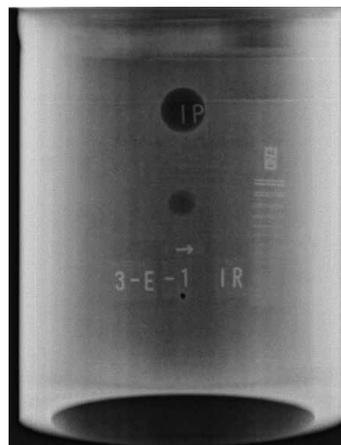


図 18 IP : 192Ir

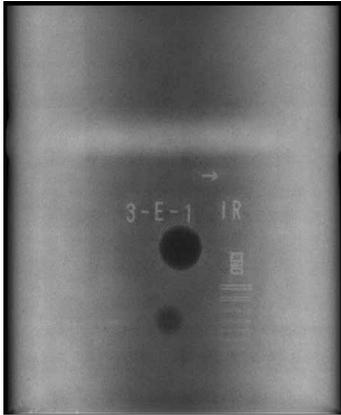


図 19 FPD : 192lr

## 5. 考察

### (1) 像質計の識別度

JIS Z 3104 : 2006 において配管の要求事項である識別最小線径 P1 級あるいは P2 級 (P2 級 : 円周溶接接手の両面を撮影する場合に得られる通常の像質) は満足することができた。

FPD はフィルムや IP とは異なり、変形させることができないので、現地配管を想定するとパノラマ撮影はあまり考えられず、配管径により二重壁片面撮影法か二重壁両面撮影法が主となるが、本試験の二重壁両面撮影法において配管の要求事項である識別最小線径 P1 級あるいは P2 級を満足することができた。また、Duplex Wire Type IQI の分解能ではフィルム、IP、FPD の各検出媒体で空間分解能に大きな違いは認められなかった。

$\gamma$ 線撮影では FPD が他の撮影媒体より画質が劣っていた。撮影条件を更に最適化することにより改善できるのか検討する余地はある。

### (2) EDM 欠陥の検出

概ね、いずれの検出媒体、線源でも EDM 欠陥は識別できていた。FPD、フィルム、IP いずれでも  $\gamma$ 線の画像では画質が X 線の場合に比べて劣る傾向が見られた。

### (3) 溶接欠陥の検出

溶接部の欠陥として融合不良とタングステン巻込みが入っているが、FPD は X 線フィルムあるいは IP と概ね同等レベルの欠陥検出能力を有していることがわかる。また、FPD、フィルム、IP いずれでも  $\gamma$ 線の画像では画質が X 線の場合に比べて劣り、欠陥の検出性は劣る傾向にあった。

### (4) 減肉部の評価

使用した放射線エネルギーの範囲ではエネルギーが高いほど内壁の両サイドが明確に識別されていることがわかった。これは著者らがフィルムや IP の試験において従来から経験している通りであり、FPD でも同様であることが確認できた。しかし、 $\gamma$ 線の場合、フィルムおよび IP では内壁の両サイドを確認することができたが、FPD の場合は識別できなかった。

## 6. おわりに

FPD を使用した配管の DR は二重壁両面撮影法で X 線フィルムとほぼ同等の品質レベルを有し、実際の溶接欠陥や局部腐食の検出に使用し得る能力を有している。像質計による品質要求に対しても X 線ではフィルムと同様に現行規格の像質をほぼ満たしている。溶接欠陥や EDM 欠陥に対してもほぼフィルムと同等に識別できることが確認できた。また、配管両サイドの壁厚については最も感度の高い IP が外壁および内壁を識別できる例が多い結果となり、IP より露出時間の掛る検出媒体より優位な傾向が見られた。

一方、 $\gamma$ 線では全ての試験において像質が劣る傾向にあり、FPD においては線質による違いの影響が顕著なのか、あるいは最適条件が出ていないのか検討を要する結果となった。

以上の結果からフィルム、IP、FPD を適材適所で使い分けることにより品質要求を維持しつつ検査の省力化を実現できる可能性があると考えられる。

## 7. 今後の課題

今後、DRの国内規格化も進むことから、配管製造の現場や配管の維持管理の分野において使用できるようになれば検査の省力化が進むと期待している。当社では今年度、FPDを導入し、マイクロフォーカスX線装置と組み合わせて、微細な割れを対象とした検査受託業務を始めている。また、低エネルギーX線だけでなく、高エネルギーX線へのFPD適用の期待も高まり、さまざまな試験撮影の検討依頼を受けている。FPD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ので、現地工事などに積極的に適用の範囲を拡げていきたいと考えている。

## 参考文献

- (1) 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
- (2) JIS Z 3104:2006：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、2006
- (3) 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
- (4) 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
- (5) JIS Z 2306:2009：放射線透過試験用透過度計、一般財団法人日本規格協会、2009

---

検査事業部  
横浜検査部  
課長

田北 雅彦

TEL. 045-759-2280

FAX. 045-759-2146

技師長

細谷 昌厚

TEL. 045-791-3550

FAX. 045-791-3555

---

検査事業部  
横浜検査部  
部長

佐藤 雅保

TEL. 045-759-2280

FAX. 045-759-2146