

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

田北 雅彦^{*1} 中村 敬治^{*2} 佐藤 雅保^{*3} 細谷 昌厚^{*4}
Takita Masahiro Nakamura Keiji Sato Masayoshi Hosoya Masaatsu

放射線透過試験 (RT) においては、イメージングプレート (IP) を用いたコンピュータドラジオグラフィ (CR) 技術や平板型半導体検出器 (フラットパネルディテクタ: FPD) を用いたデジタルラジオグラフィ (DR) 技術の進歩が著しい。CR については国内外において既に多くの研究成果が報告⁽¹⁾⁽²⁾され、その性能はほぼ把握されている一方、FPD を用いた DR については海外での研究報告⁽²⁾⁻⁽⁴⁾はあるものの、国内ではほとんど見当たらない。特に高エネルギー X 線を用いた研究報告はない。そこで、本報告では代表的な FPD について、きず検出基本性能をフィルム、IP と比較して把握し、FPD 適用の可能性を示した。

キーワード：放射線透過試験 (RT)、コンピュータドラジオグラフィ (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

放射線透過試験では従来からフィルムが最もよく使われている。しかしながら、最近では試験コストの低減や環境に対する負荷低減、記録の保管管理等の観点から CR 技術や DR 技術がフィルムに代わるものとして注目されている⁽¹⁾。

当社ではフィルムと同様に変形が可能であり、同等の撮影配置が可能であることから、CR システムを既に導入し、実際の試験に適用している。しかし、CR システムに使われている IP は比較的低エネルギー領域にきず検出感度のピークがあるため、高エネルギー X 線に対して著しい像質の低下が起り、プラント等の厚肉鋼材への適用には

不向きである。

そこで、現状の検出器の中で高エネルギー X 線に対して良好な像質を得られる可能性がある検出器として、FPD を用いた DR システムを検討することとした。その第一ステップとして本稿では、高エネルギー X 線を用いて FPD のきず検出基本性能について試験を行い、フィルムおよび IP と比較を行ったので報告する。

2. FPD システムの概要

FPD システムは、図 1 に示すようにパソコン、高精細モニタ、FPD 本体から構成されている。パソコン上で取り込み条件を設定後、X 線を照射することにより、モニタ上に撮影画像が表示され、

*1：検査事業部 横浜検査部 課長

*2：検査事業部 事業部長補佐

*3：検査事業部 横浜検査部 部長

*4：技師長

必要な処理を行った後、保管される。

本システムはフィルムとは異なり、現像処理を行う必要がない。また、IPとも異なり、レーザー光を用いてデータの読み取りや消去を行う必要もない。ただし、フレキシブルではないのでフィルムと同等の撮影配置は難しいが、配管等のパノラマ撮影以外では品物の後ろに FPD を配置できれば、フィルムと変わらない撮影配置が実現できる。また、機種によってはリアルタイム撮影（動画）に対応できるなど応用範囲は広い。本研究ではシンチレータが GOS タイプの二種類の FPD を用いて、きず検出基本性能の確認を実施した。

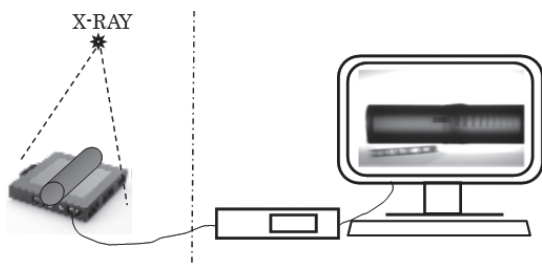


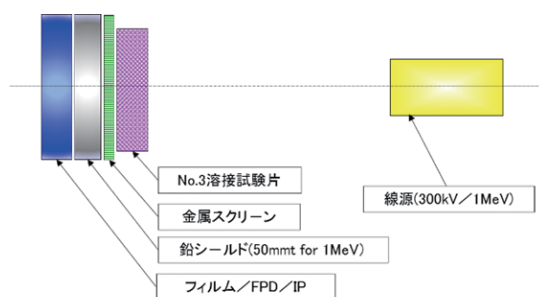
図1 FPD システムの基本構成

3. 試験方法

撮影対象はタンゲステン球を溶接部に挿入した SM490A 突合せ溶接試験片で溶接後、機械加工を行った、板厚 38mm の平板である⁽⁵⁾。300kV、1MeV、9MeV の各エネルギーでフィルム、IP および FPD で撮影をした。フィルムは富士フィルム製 #50、IP は同じく富士フィルム製 ST- VI を用いた。FPD には海外の A 社製品および B 社製品を対象とした。放射線源にはそれぞれ SMART300、ML-1R III、LINATORON M9 を用いた。FPD は 300keV の場合、1,000mm、1MeV の場合、1,500mm、9MeV の場合、2,000mm とした。照射時間および FPD の積分処理条件（露出時間、取り込み画像フレーム数）はそれぞれ、最適な画像が得られるように設

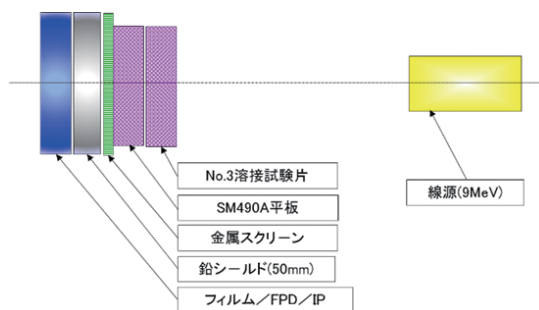
定した。その他の試験条件は ISO17636-2:2013 を参考として設定した。なお、フィルムおよび IP の画像のデジタイザースキャンピッチは $50\mu\text{m}$ とした。

撮影配置は 300kV と 1MeV については図 2 のとおりで溶接試験片のみの材厚を撮影対象とした。また、9MeV では溶接試験片に 38mm の SM490A 鋼板を加え 76mm の材厚として図 3 のとおり撮影した。



(注記) 鉛シールドはFPDの電子回路部(受光部の周辺)をX線照射から保護するために設置

図2 300kV および 1MeV の撮影配置



(注記) 鉛シールドはFPDの電子回路部(受光部の周辺)をX線照射から保護するために設置

図3 9MeV の撮影配置

金属スクリーンには Pb、Cu、Fe の薄板を用い、それぞれ単体あるいは 2 種類の材質の組み合わせを用いた。また、IP だけでなく全ての撮影媒体に適用して同じ条件で試験を実施した。

透過度計および像質計の配置は図 4 のとおり配置して撮影をした。撮影時における X 線源側から見た試験片および FPD の状況を図 6 に示す。

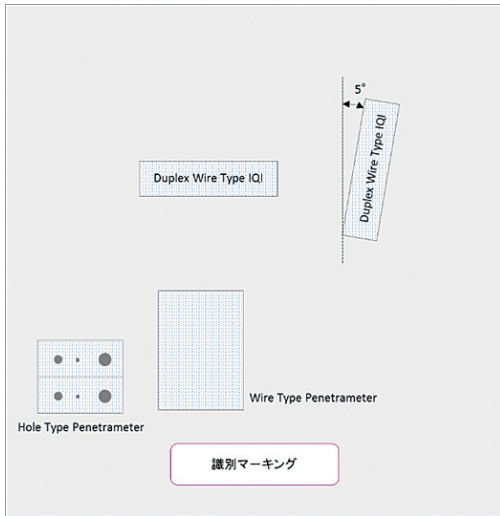


図4 透過度計 / 像質計配置



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5 Duplex Wire (複線線像質計)
(EN462-5:1996)

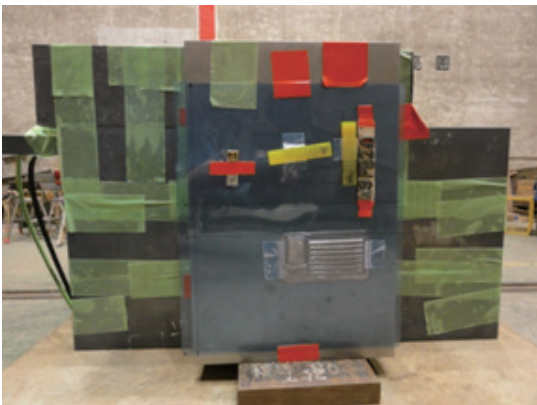
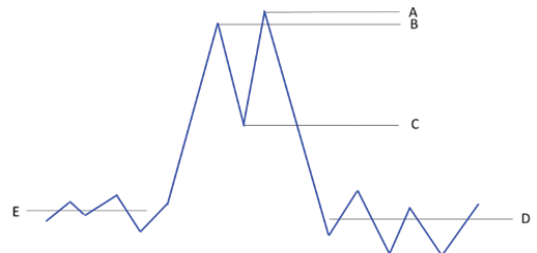
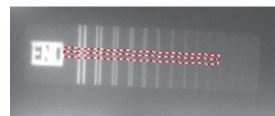


図6 FPDの高エネルギーX線撮影の状況

撮影して得られた画像から図5のDuplex Wireによるラインプロファイルを取り、最も小さい線対を選び空間分解能を図7のとおり評価した。空間分解能 (Spatial Resolution) は図7の式から計算される値で線対の分解能の程度を示している。なお、画像処理および分解能の評価にはドイツ連邦材料試験研究所 (Federal Institute for Materials Research and Testing, BAM) の画像処理ソフトウェア「ISee! ver.1.10.2」⁽⁶⁾を使用した。



$$Resolution = \left(1 - \left[\frac{C - \frac{(E+D)}{2}}{\frac{(B-E) + (A-D)}{2}}\right]\right) * 100$$



(ラインプロファイル例)

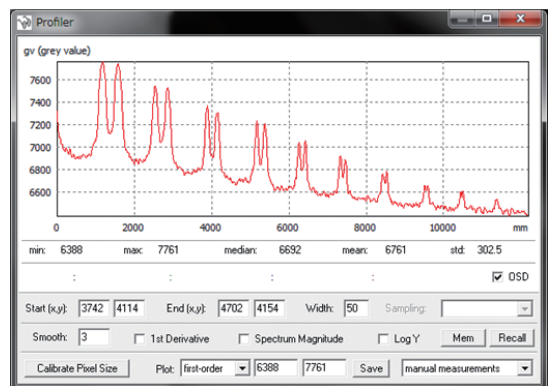


図7 Duplex Wire を用いた空間分解能評価

4. 結果および考察

4.1 9MeV の放射線透過撮影画像

図 8、図 9、図 10 は 9MeV の高エネルギー X 線により撮影したフィルム、IP、FPD の放射線透過撮影画像である。従来のフィルム撮影の画像と違い、FPD は撮像過程で積分処理があるため、独特のコントラストが得られている。フィルムと FPD の画像は Duplex Wire、JIS 線形透過度計、ASTM 有孔形透過度計の像が比較的鮮明に写っているが、IP では全体的に散乱線の影響なのか、ムラがあり、かつ鮮明さに欠ける。

因みにフィルムと IP の画像で中心部に薄く丸い像が現れているのは X 線の強度を平坦化するために X 線装置に内蔵されているイコライザー（凸レンズ状の金属版）の影響である。

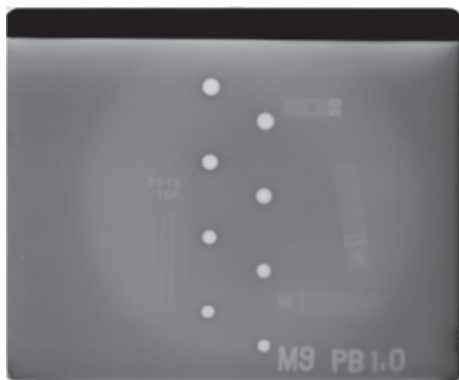


図 8 9MeV フィルム画像

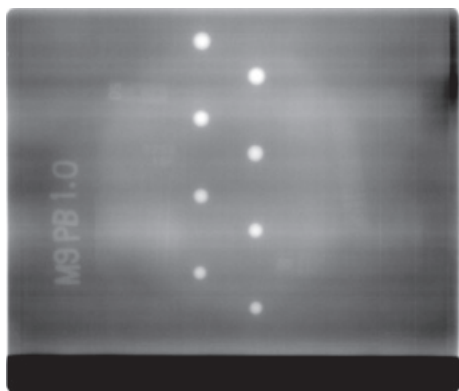


図 9 9MeV IP 画像

4.2 Duplex Wire を用いた空間分解能計測結果

図 11、図 12、図 13 に X 線エネルギー 300keV、1MeV、9MeV それぞれについてフィルム、FPD、IP の空間分解能（Spatial Resolution）を比較して示している。

図 11、図 12 において測定点のバラツキは多いものの、空間分解能の傾向はフィルム、IP、A 社 FPD、B 社 FPD の順に良い結果となった。

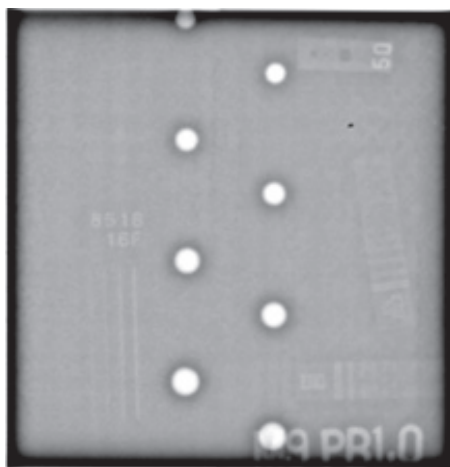


図 10 9MeV FPD 画像

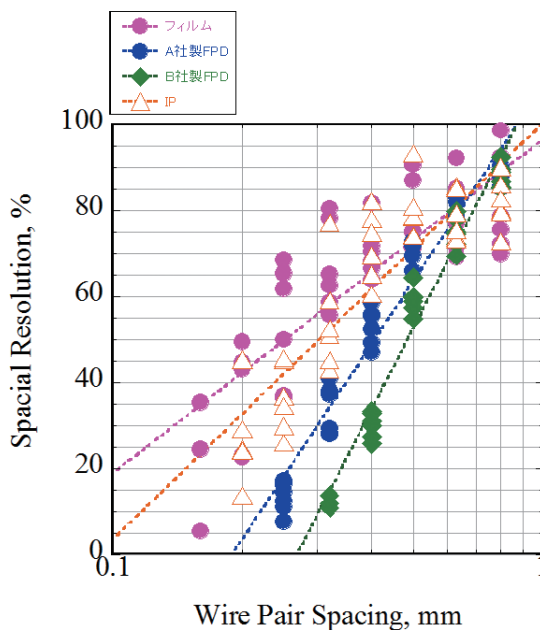


図 11 フィルム、FPD、IP の空間分解能 (X 線エネルギー：300keV)

一方、9MeV の場合、A 社 FPD のデータはほぼフィルムと同等の傾向を示した。また、9MeV における IP では直線の傾きからも明らかなように最小線対の空間分解能は劣っていることが明らかとなった。FPD の特徴として、積分処理して 1 枚の画像として表すため、フィルムや IP と比較してコントラストの良い像質が得られると考えられる。

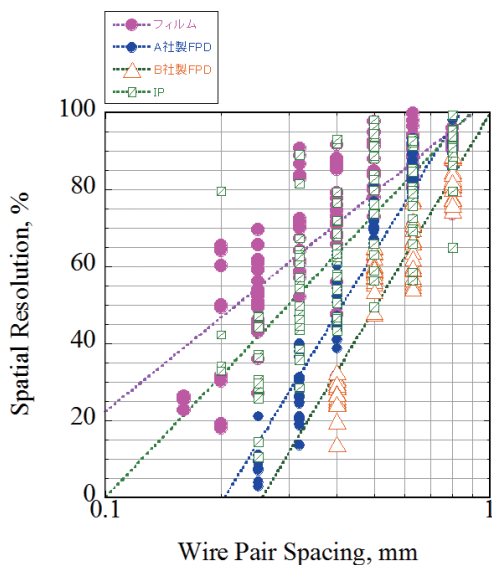


図 12 フィルム、FPD、IP の空間分解能 (X 線エネルギー : 1MeV)

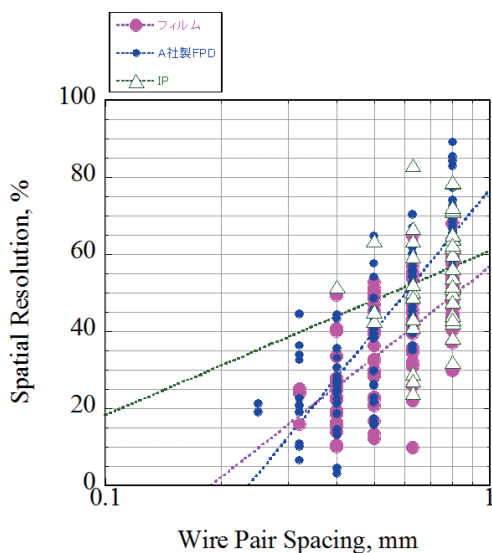


図 13 フィルム、FPD、IP の空間分解能 (X 線エネルギー : 9MeV)

また、フィルムはデジタル画像に変換したデータを評価に採用しているため、スキャン過程で少なからず像質劣化が含まれている。

4.3 基本空間分解能と X 線エネルギーの関係

基本空間分解能 (Basic Spatial Resolution : SRb) とは Duplex Wire で最初に空間分解能が 20% 未満となる線対の線間距離のことをいう。

図 7 において空間分解能の評価方法を示したが、これは最小線間の谷が全体の 20% 以上ある場合に 2 本の線対は分離 (認識) されているとして識別の程度を示すもので、EN14784-1 等の規格に定義されている。図 14 は、SRb の平均値に及ぼす X 線エネルギーの影響を示したグラフである。

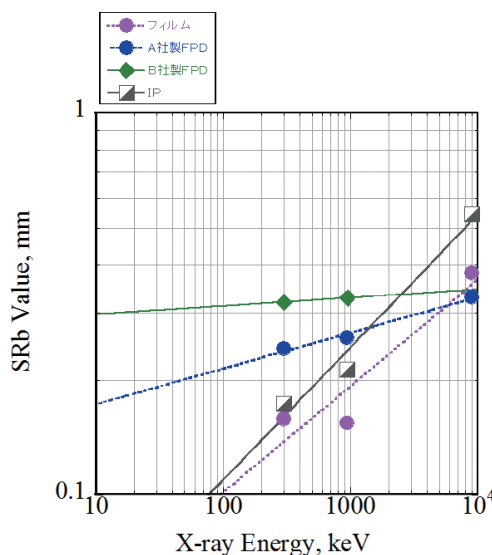


図 14 SRb の平均値と X 線エネルギーの関係

300keV と 1MeV では SRb はフィルム、IP、A 社 FPD、B 社 FPD の順に優れているが、9MeV ではフィルムと A 社製 FPD および B 社製 FPD がほぼ同じ SRb であるのに対して、IP については SRb が大きくなり分解能が明らかに低下していることがわかる。IP に注目すると 1MeV 付近で他の検出器とクロスしていることからこの付近のエネル

ギーを超えた IP の使用は、高い分解能が要求される試験では適用できないと言える。

4.4 JIS 線形透過度計を用いた識別最小線径の計測結果

材厚 78mm の鋼材に 9MeV の X 線を照射した場合に使用する線形透過度計は JIS Z3104 によると図 15 に示すように 16F が適用され、A 級（旧、普通級）では 1.0mm ワイヤ（太い方から 3 本目）、B 級（旧、特級）では 0.8mm ワイヤ（太い方から 4 本目）が識別されなければならない。

本試験の結果ではフィルムと FPD で 0.8mm を識別できたが、IP では 1.25mm（2 本目）が識別最小線径となった。従って、FPD は線形透過度計の識別度を A 級、B 級ともに満足したが、IP では A 級でも満足しないことがわかった。別の試験で高精細タイプ IP（GESIT-IPU）を使用して同様の撮影を実施したが、照射時間が 9 倍近く掛った上に辛うじて 3 本目ワイヤが見えたという結果を得ている。また、その画像はムラが多く実際の検査に耐え得る品質でないことに加え、高感度による時間短縮等のメリットがないという結果を得ている。

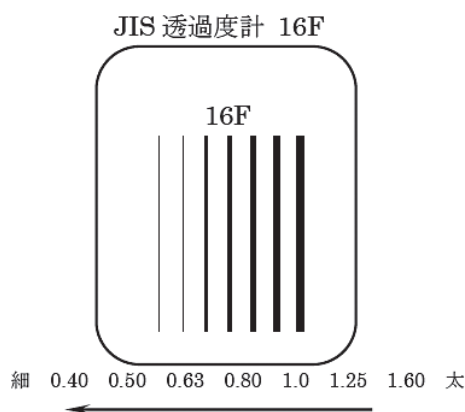


図 15 JIS Z 3104 線形透過度計と線径

4.5 金属スクリーンの効果

ISO17636-2 2013 では IP の散乱線防止による像質の改善を目的に金属スクリーンの適用が要求されている。IP だけでなくその他の検出器にも散乱線は同様に影響していると考えられるので確認のため金属スクリーンを適用して試験を行った。ここでは IP の分解能低下が認められている 9MeV のデータのみを示すことにする。

図 16 では、金属スクリーンの厚さが 2mm 付近で空間分解能の向上が認められた。9MeV の X 線エネルギーの撮影において 2mm という値は ISO17636-2 の要求である 0.6mm ~ 4.0mm の金属スクリーン（Fe、Cu、Pb）の範囲にあり、散乱線防止効果が表れている可能性がある。ただし、図 9 を始めとして IP を用いた撮影画像が著しく改善するものではなかった。

5. CR および DR 関連規格の現状⁽⁷⁾

CR あるいは DR 技術が国内において広く産業界に受け入れられるには装置の能力向上や技術の向上と共に国内規格の整備が必要であることは言うまでもない。本稿の最後に規格の国内外の整備状況について簡単に触れる。

海外においては EN、ISO、ASTM において表 1 のように規格が整備されており、実際の試験に支障がないようになっている。

一方、国内においては日本非破壊検査協会の放射線部門および日本溶接協会の非破壊試験技術実用化研究委員会（AN 委員会）が鋭意、JIS 化に向けた検討を進めているが、現時点では残念なことに JIS として発行されていない。国内技術を停滞させないためにも一日も早い JIS 制定が望まれる。

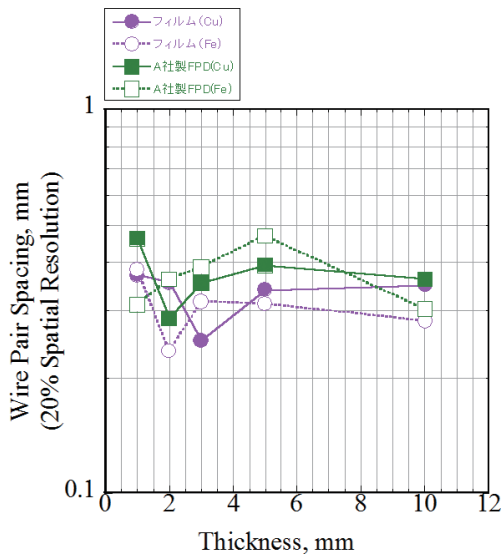


図 16 Duplex Wire の分解能に影響を及ぼす金属スクリーン厚さ (X線エネルギー：9MeV)

表 1 海外における CR および DR 関係規格

No	規格 No.	規格タイトル
1	EN 14784-1 (2005)	Non-destructive testing-Industrial Computed radiography with storage phosphor imaging plates Part 1:Classification of systems
2	EN 14784-2 (2005)	Non-destructive testing-Industrial Computed radiography with storage phosphor images plate Part 2:General Principle for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays
3	EN 465-5 (1996)	Non-destructive testing-Image quality of radiographs Part 5:Image quality indicators(duplex wire type), determination of image unsharpness value
4	ISO 16371-1 (2011)	Non-destructive testing-Industrial Computed radiography with storage phosphor imaging plates Part 1:Classification of systems
5	ISO/NP 16371-2	Non-destructive testing-Industrial Computed radiography with storage phosphor images plate Part 2:General Principle for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays
6	ISO/DIS 19232-5	Non-destructive testing-Image quality of radiographs Part 5:Image quality indicators(duplex wire type), determination of image unsharpness value
7	ISO/17636-2 (2013)	Non-destructive testing of welds-Radiographic testing Part 2:X- and gamma-ray technique with digital detectors
8	ASTM E2446-05	Standard Practice for Classification of Computed Radiography Systems
9	ASTM E2007-08	Standard Guide for Computed Radiography (PSL Method)
10	ASTM E2033-99	Standard Practice for Computed Radiography (PSL Method)
11	ASTM E2445-05	Standard Practice for Qualification of Computed Radiography Systems
12	ASTM E2002-98	Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness
13	ASTM E1647-03	Standard Practice for Determining Contrast Sensitivity in Radiology
14	ASTM E2736-10	Standard Guide for Digital Detector Array Radiology

6. まとめ

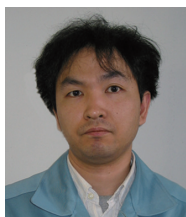
高エネルギー X線源を用いた FPD の基本性能についてフィルム、IP と比較検討をした。

現状の放射線透過試験の検出媒体として分解能の観点でフィルムに勝るものはない。実際に 300kV および 1MeV ではフィルムの方が FPD より基本分解能は勝っているが、9MeV ではほぼ同等となり、高エネルギー X線領域において FPD の実用性の可能性が明らかとなった。今後、実際の各種部品への適用を通して、その能力や特徴を多方面から明らかにしていく予定である。

医療分野とは異なり、工業分野ではより優れた耐久性や耐環境性、可搬性が求められるが、未だ、十分には実証されていないと思われる。また、高エネルギー X線照射になればなるほど、FPD 撮像部周辺の電子機器を鉛等で遮蔽する必要があることも可搬性の観点で課題である。因みに本研究では 9MeV の照射では厚さ 50mm の鉛で遮蔽した。さらに、現像処理やデータの読み取り・消去の手間がないとはいえ、フィルムや IP に比べて、装置が現状、かなり高価である点も課題といえる。今後、更なる低コスト型 FPD の出現が望まれる。いくつかの課題はあるものの、適用分野を限定することによって放射線透過試験の大幅なコストダウンや省力化が図れることは大きな魅力であるので、当社としても積極的に FPD の適用検討を推進していく予定である。

参考文献

- (1) 成川：最新のコンピューテッド・ラジオグラフィ、非破壊検査、61（4）、pp.141-147、(2012)
- (2) K.LaCivita: Use of Digital Radiography for Final Part Acceptance of Aerospace Castings, Materials Evaluations, 70（8）, pp.915-922
- (3) U.Ewert etl: Image Quality in Digital Industrial Radiography, Materials Evaluations, 70（8）, pp.955-964, (2012)
- (4) K.Bavendiek etl: Best Energy Selection for Different Applications with Digital Detector Array from 20 to 600 keV, Materials Evaluations, 70（8）, pp.965-974, (2012)
- (5) 特許第 5126915 号：非破壊試験用溶接試験片の製作方法
- (6) http://www.bam.de/en/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_8/fg83/fg83_ag5.htm
- (7) 加藤他：デジタルラジオグラフィ関連規格の現状について、非破壊検査、62（4）、pp.152-156、(2013)



検査事業部
横浜検査部
課長
田北 雅彦
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146



検査事業部
横浜検査部
部長
佐藤 雅保
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146

検査事業部
事業部長補佐
中村 敬治
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146

技師長
細谷 昌厚
TEL. 045-791-3550
FAX. 045-791-3555