

デジタル RT を用いた厚板についての試験研究

田北 雅彦^{*1} 大岡 紀一^{*2} 河原 大吾^{*3} 根本 好弘^{*4}
Takita Masahiro Ooka Norikazu Kawahara Daigo Nemoto Yoshihiro

当社では、IHI 横浜工場および相生工場における非破壊検査を担当し中でも放射線検査では、産業用高エネルギー X 線装置や放射性同位元素などを導入し原子力機器や火力発電プラントなどに関する厚板の放射線透過試験 (RT) を実施している。一方、デジタル RT (DR) については、規格化⁽¹⁾を考慮して数年来 IP (イメージングプレート) および DDA (デジタルディテクタアレイ) 適用の研究⁽²⁾を継続しており、これまでは 950keV と 9MeV の直線加速器を使用した透過試験の検討を実施してきた。本研究では、3MeV と 9MeV の高エネルギー X 線発生装置 (直線加速器) を用いフィルム、IP、DDA による透過試験を実施し、撮影条件や識別性などの比較検討をした。

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)、デジタルディテクタアレイ (DDA)、フィルム RT (F-RT)、複線画像質計 (DW)、イメージクオリティインジケータ (IQI)

1. はじめに

工業分野におけるデジタル RT (DR) は 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」⁽³⁾として規格化されている。当社では、規格化以前よりデジタル RT 機材の導入を進めているが、主な用途は社内検査や現地配管の減肉調査など限定的である。近年、DR は、本格的な導入に向け一般社団法人日本ガス協会、一般社団法人日本ボイラ協会、一般社団法人日本鋳鍛鋼会などで業界基準・規則の整備に向け具体的な検討が進められており、今後さらに普及が進むものと考えられる。当社では、高エネルギー X 線発生装置 (直線加速器) を用いた

大型プラント向け厚板の放射線透過試験で多くの実績を有するが、この分野においても DR の適用が拡大するものとする。従来のフィルム RT (F-RT) では原子炉格納容器や各種プラントのバルブ RT を対象に材厚 400mm までの厚板に対する検査実績がある。厚板に対する DR の適用については、段階的に比較検討を進めているところであり、JIS Z 3110 に準じる撮影に要する基礎条件やノウハウなどの蓄積と知見の拡充を進めている。本稿では、これら DR 適用についての取組みを紹介する。

2. 高エネルギー X 線発生装置による DR

2.1 IQI・試験体の撮影配置など

3MeV および 9MeV の高エネルギー X 線発生装置

*1: 検査事業部 横浜検査部 次長

*2: 一般社団法人日本溶接協会 (AN 研究委員会 TF 顧問)

*3: 東京都立産業技術研究センター (AN 研究委員会 TF メンバー)

*4: 元株式会社 IHI キャスティングス (AN 研究委員会 TF メンバー)

置(直線加速器)とその撮影配置などおよび外観写真を、**図1～図5**に示す。試験に用いた試験体は、溶接試験片 t38mm に SM490A 鋼板を加え、各試験体厚さとした。

2.2 試験マトリクス

3MeV および 9MeV の直線加速器による撮影条件を**表1**および**表2**に示す。

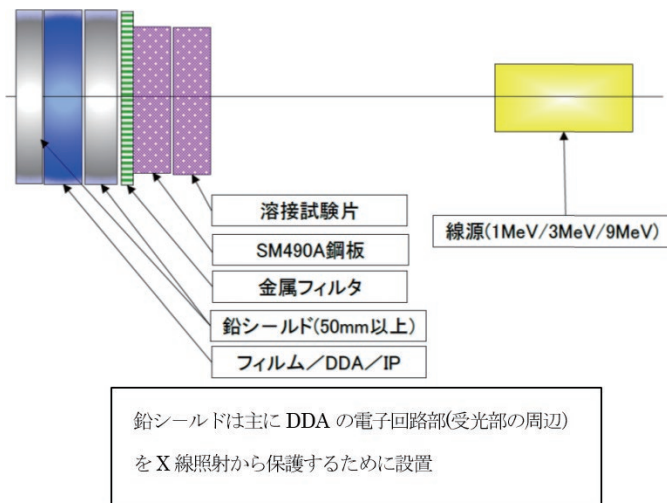


図1 直線加速器と試験体の配置



図2 3MeV 直線加速器

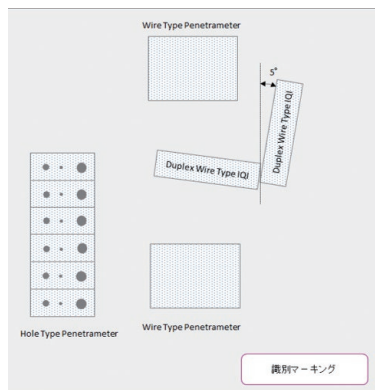


図4 IQI およびマーク配置

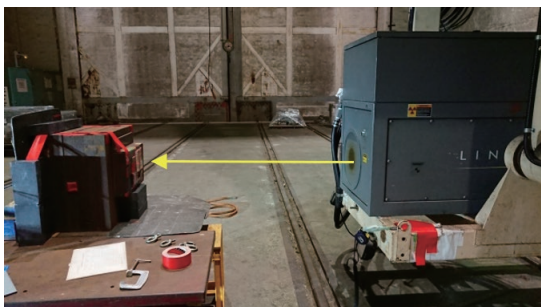


図3 9MeV 直線加速器

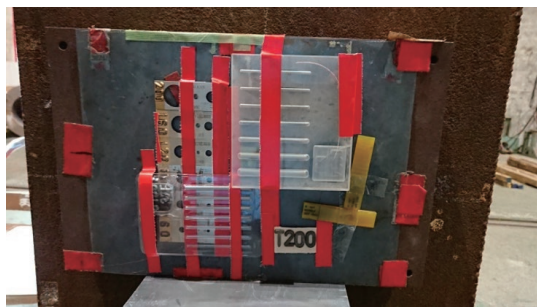


図5 各 IQI とマークの配置

表 1 3MeV での撮影条件

(相生工場：3MeV 直線加速器、線源-ディテクタ間距離 SDD：1500mm)

FILM									
試験体厚さ	エネルギー	FDD	前置 フィルタ	中間 フィルタ	前方 スクリーン	FUJI FILM	後方 スクリーン	後方遮蔽	撮影
50 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
80 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
100 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
150 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
200 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○

CR									
試験体厚さ	エネルギー	FDD	前置 フィルタ	中間 フィルタ	前方 スクリーン	FUJI IP	後方 スクリーン	後方遮蔽	撮影
50 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
80 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
100 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
150 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
200 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○

DDA									
試験体厚さ	エネルギー	FDD	前置 フィルタ	中間 フィルタ	前方 スクリーン	DDA	後方 スクリーン	後方遮蔽	撮影
50 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
80 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
100 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
150 mm	3MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
200 mm	3MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○

表 2 9MeV での撮影条件

(横浜工場：9MeV 直線加速器、線源-ディテクタ間距離 SDD：2000mm)

FILM									
試験体厚さ	エネルギー	FDD	前置 フィルタ	中間 フィルタ	前方 スクリーン	FUJI FILM	後方 スクリーン	後方遮蔽	撮影
50 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
80 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
100 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
150 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
200 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	# 50 Fuji	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○

CR									
試験体厚さ	エネルギー	FDD	前置 フィルタ	中間 フィルタ	前方 スクリーン	FUJI IP	後方 スクリーン	後方遮蔽	撮影
50 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
80 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
100 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
150 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
200 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	ST-VI	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○

DDA									
試験体厚さ	エネルギー	FDD	前置 フィルタ	中間 フィルタ	前方 スクリーン	DDA	後方 スクリーン	後方遮蔽	撮影
50 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
80 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
100 mm	3 MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
150 mm	3MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○
200 mm	3MeV	1500 mm	-	-	Pb 1 mm	GESIT	Cu 2 mm	Pb 9 mm	○

注：Pb 増感紙はフィルムのみ使用

2.3 試験画像 (図 6～図 19:紙面の都合上、9MeV の画像のみ)

試験マトリクスのとおり 3MeV、9MeV の直線
加速器を用いて従来 RT と比較し規格適合性を評
価する。

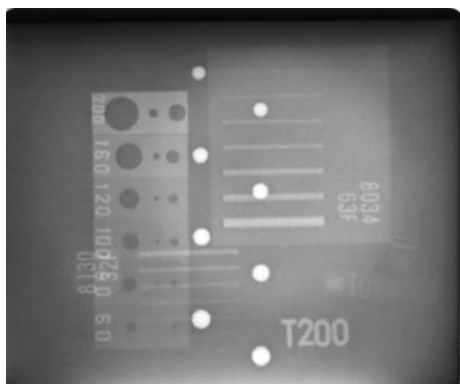


図 6 FILM 9MeV t200mm

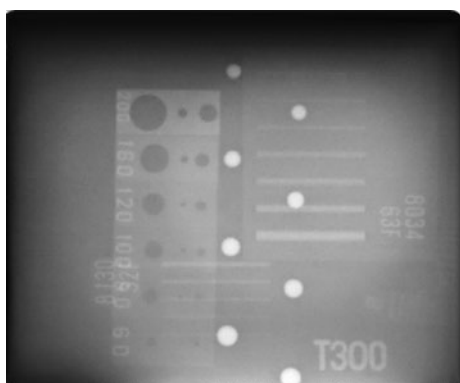


図 7 FILM 9MeV t300mm

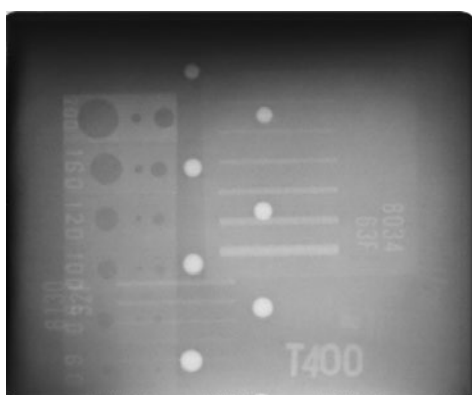


図 8 FILM 9MeV t400mm

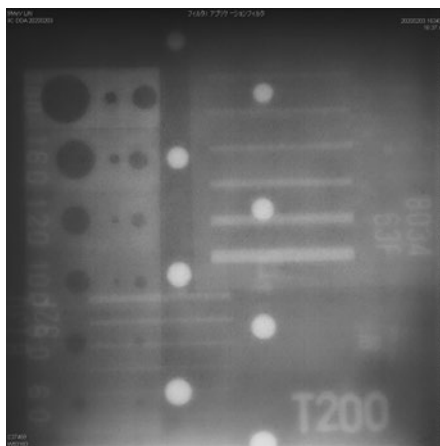


図 9 DDA 9MeV t200mm

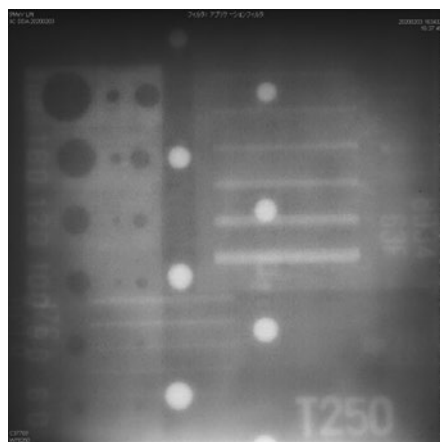


図 10 DDA 9MeV t250mm



図 11 DDA 9MeV t300mm

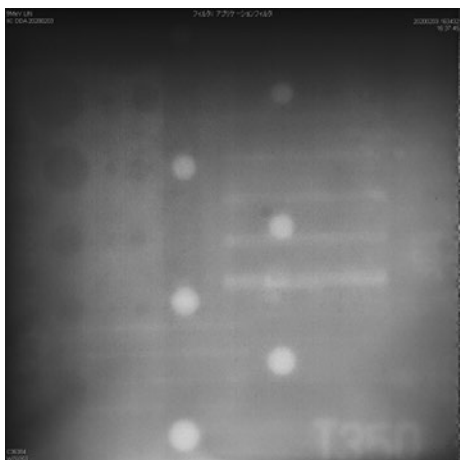


図 12 DDA 9MeV t350mm

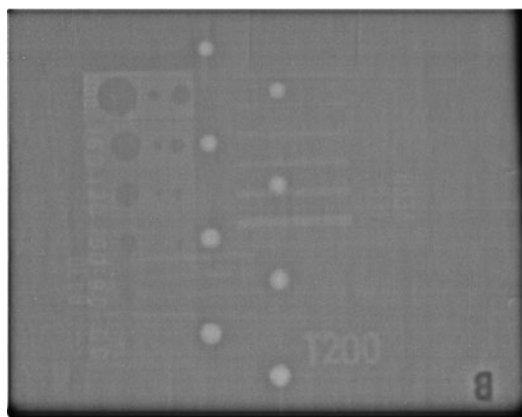


図 15 IP 9MeV t200mm

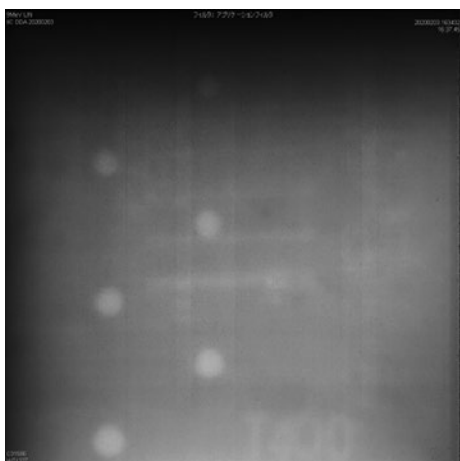


図 13 DDA 9MeV t400mm

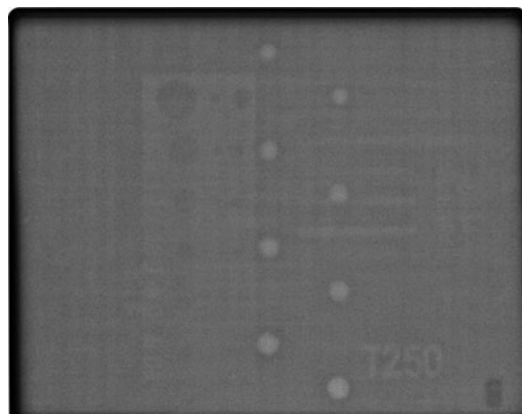


図 16 IP 9MeV t250mm

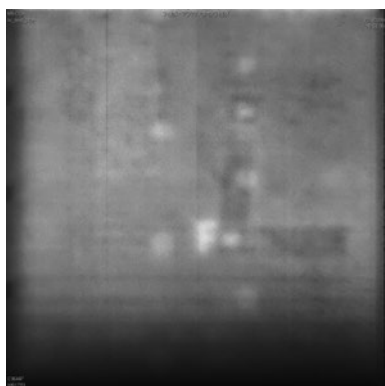


図 14 前回 DDA 9MeV t400mm

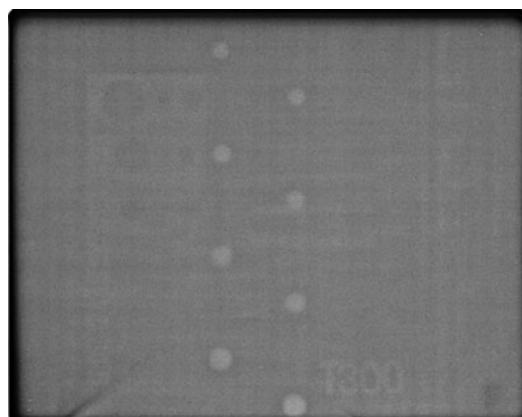


図 17 IP 9MeV t300mm

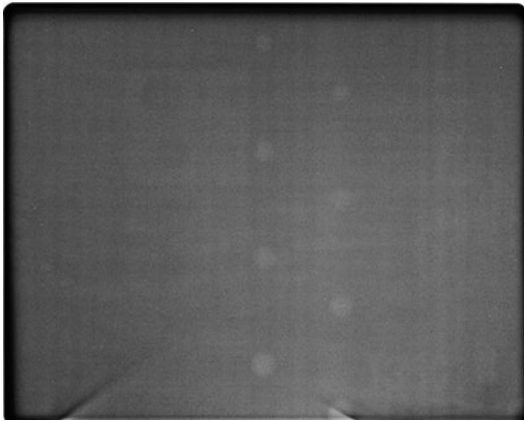


図 18 IP 9MeV t350mm



図 19 IP 9MeV t400mm

IP と FILM はサイズが 10×12 インチ、DDA は 8×8 インチ、貼り付ける画像の元サイズが違うため DDA は少し引延しによる拡大表示となる。

3. 試験結果

今回の試験では、3MeV および 9MeV のそれぞれの直線加速器での撮影において濃度 2.0 が得られる撮影条件を基準に各撮影媒体に必要な放射線量を確認し、さらに DDA による撮影では、積算回数と信号対ノイズ比(SNR)の関係を明らかにした。それらの結果は 3.1 節に示す。

また、検査の可否を判断するうえで最も重要な像質を確認した結果を 3.2 節に示す。

3.1 基本撮影条件

露出線図：FILM と DDA (積算回数 25 含む) および CR(IP) を図 20、図 21 に示す。

(1) 3MeV の撮影条件 (図 20)

フィルム濃度 2.0、DDA-GV 値 1300、SNRn200 (目標値)、距離 1500mm (装置出力 0.15Gy/min at 1m)

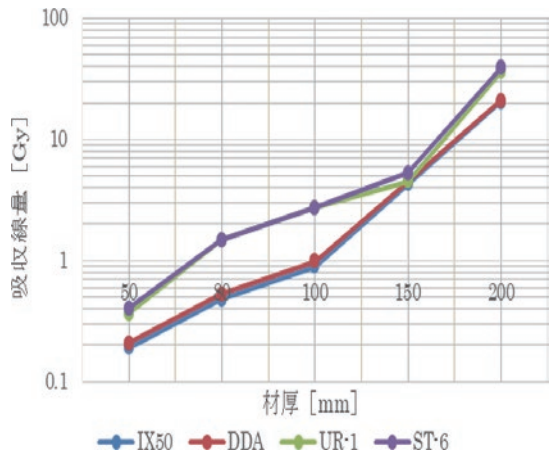


図 20 3MeV 各ディテクタの露出線量

(2) 9MeV の撮影条件 (図 21)

フィルム濃度 2.0、DDA-GV 値 1300 (積算回数 25 回)、距離 2000mm (装置出力 20Gy/min at 1m)

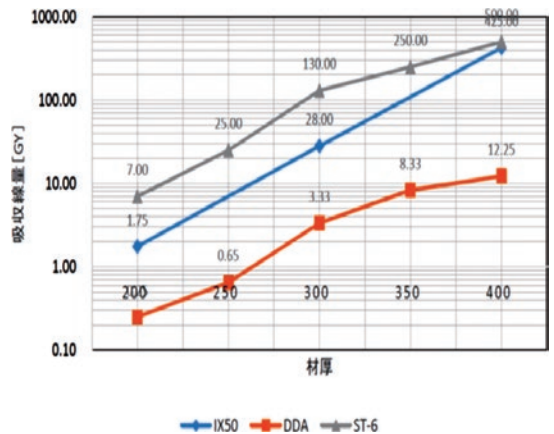


図 21 9MeV 各ディテクタの露出線量

(3) DDA 積算回数と信号対ノイズ比 (SNR) の関係

DDAによる撮影では、検査に使用可能な撮影画像を得るうえで積算処理が必須の場合が多く、ソフトウェアでその回数を指定できるようになっている。この処理は、画像を重ね合わせる積算処理を行うことにより画像の平均化処理を行い、ノイズを低減させ像質を向上させることを可能とする。前回の試験では、図 22 に示すようにエネルギー 9MeV の撮影において材厚 t77mm と t150mm の撮影で積算回数と SNR 値の関係を確認し、最適と考えられる積算回数を 25 回とし、それ以上は SNR が向上しないことを確認している。最適な積算回数はエネルギーや DDA の特性などで変化する可能性があると思われるが、今回の試験では、前回試験で得られた知見に基づき、積算回数を 25 とした画像で増質の比較を行った。

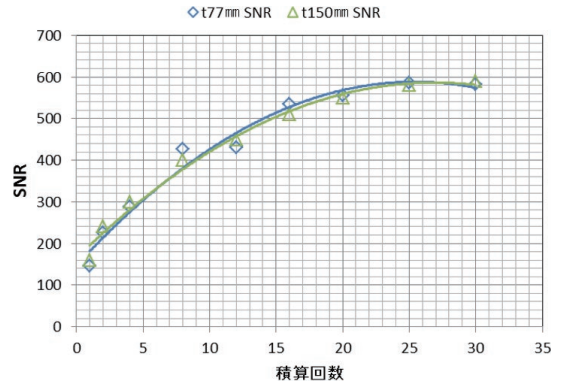


図 22 DDA 積算回数と SNR の関係

3.2 像質計の識別結果

像質計の識別結果⁽⁴⁾は、表 3 および表 4 に示すように、3MeV および 9MeV の直線加速器による画像で、複線形像質計の基準値⁽⁵⁾が共に満足されなかった。この像質計については、1MeV 以下のエネルギーでは参考値とすることに問題のない社内データ⁽⁶⁾が得られているが 600kV を超えるエネルギーでの使用は望ましくないとの海外文献⁽⁷⁾による見解がある。針金形透過度計の像質では、DDA において材質が薄い方でクラス B の像質を、材質が厚くなるにつれてクラス A の像質を満足する。CR については、規格に基づく像質が満足できないことを確認した。有効形透過度計での像質の確認では、DDA では基準値以上の像質が得られること、CR では基準値を満足することを確認した。

表 3 3MeV 直線加速器 像質計識別の結果

複線形像質計					
材厚(mm)	ISO19232-5/JS Z 2307	ISO19232-5/JS Z 2307 B	FILM	DDA	CR
30	D7	D9	D5	D6	D3
80	D6	D9	D4	D5	D1
100	D6	D9	D4	D4	-
150	D6	D8	D3	D2	-
200	D5	D8	D3	D1	-
針金形透過度計					
材厚(mm)	JS Z 2306 Wire Type A	JS Z 2306 Wire Type B	FILM	DDA	CR
30	0.63mm (W9)	0.50mm (W9)	0.50mm (W9)	0.50mm (W9)	0.80mm (W7)
80	0.80mm (W7)	0.63mm (W8)	0.50mm (W9)	0.50mm (W9)	1.00mm (W6)
100	1.00mm (W6)	0.63mm (W8)	0.80mm (W7)	0.80mm (W7)	1.60mm (W4)
150	1.00mm (W6)	0.80mm (W7)	0.80mm (W7)	1.00mm (W6)	2.50mm (W2)
200	1.25mm (W5)	0.80mm (W7)	0.80mm (W7)	1.00mm (W6)	2.50mm (W2)
有孔形透過度計					
材厚(mm)	ASME/ASTM E1025 Hole Type A	ASME/ASTM E1025 Hole Type B	FILM	DDA	CR
30	2T (X35) 1.78mm	-	2T (X35) 1.78mm	2T (X35) 1.78mm	2T (X40) 2.03mm
80	2T (X50) 2.54mm	-	2T (X35) 1.78mm	2T (X35) 1.78mm	2T (X50) 2.54mm
100	2T (X50) 2.54mm	-	2T (X40) 2.03mm	2T (X40) 2.03mm	2T (X60) 3.05mm
150	2T (X60) 3.05mm	-	2T (X50) 2.54mm	2T (X50) 2.54mm	2T (X60) 3.05mm
200	2T (X80) 4.06mm	-	2T (X50) 2.54mm	2T (X60) 3.05mm	2T (X60) 3.05mm

赤枠：規格基準値 赤字：像質クラス B または基準を満足 緑字：像質クラス A を満足

表 4 9MeV 直線加速器 像質計識別の結果

複線形像質計					
材厚(mm)	ISO19232-5/JS Z 2307 A	ISO19232-5/JS Z 2307 B	FILM	DDA	CR
200	D5	D8	D3	D2	D1
250	D5	D7	-	D2	-
300	D4	D7	D2	D1	-
350	D4	D7	-	-	-
400	D4	D7	D2	-	-
針金形透過度計					
材厚(mm)	JS Z 2306 Wire Type A	JS Z 2306 Wire Type B	FILM	DDA	CR
200	1.25mm (W5)	0.80mm (W7)	0.80mm (W7)	0.80mm (W7)	1.60mm (W4)
250	1.25mm (W5)	1.00mm (W6)	-	1.00mm (W6)	1.60mm (W4)
300	1.60mm (W4)	1.00mm (W6)	0.80mm (W7)	1.60mm (W4)	2.00mm (W3)
350	1.60mm (W4)	1.00mm (W6)	-	1.60mm (W4)	4.00mm (W0c)
400	1.60mm (W4)	1.25mm (W5)	1.00mm (W6)	2.00mm (W3)	-
有孔形透過度計					
材厚(mm)	ASME/ASTM E1025 Hole Type A	ASME/ASTM E1025 Hole Type B	FILM	DDA	CR
200	2T (X80) 4.06mm	-	2T (X60) 3.05mm	2T (X60) 3.05mm	2T (X80) 4.06mm
250	2T (X100) 5.08mm	-	-	-	2T (X100) 5.08mm
300	2T (X120) 6.10mm	-	2T (X60) 3.05mm	2T (X60) 3.05mm	2T (X120) 6.10mm
350	2T (X160) 8.13mm	-	-	2T (X100) 5.08mm	2T (X160) 8.13mm
400	2T (X160) 8.13mm	-	2T (X60) 3.05mm	2T (X100) 5.08mm	2T (X160) 8.13mm

赤枠：規格基準値 赤字：像質クラス B または基準を満足 緑字：像質クラス A を満足

4. まとめ

本研究では、フィルムと DDA および IP の撮影において以下 3 項目について知見を得ることができた。

(1) 3MeV の X 線を使用した DR の検証

これまで、300kV、1MeV、9MeV の X 線による DR 適用の知見は有していたが、今回の試験では、3MeV の直線加速器による、板厚 t50 ~ 200mm の撮影を実施することで、3MeV の X 線による DR を導入に要する基礎データを収集できた。これにより業容拡大に資する知見を拡充できたと考える(3MeV 直線加速器の露出条件および高エネルギー X 線使用による識別性、DDA の最適積算回数と SNR の関係など)。

(2) 高出力化による像質の向上

今年度は、**図 13** に示すように材厚 400mm において文字や透過度計が確認できるレベルに像質を改善させることができ、評価可能な像質が得られることを確認した。なお、像質改善の過程は、以下に示す。昨年度は**図 14** に示すように規格を満足する像質の透過像を得ることができなかった。

今年度は、装置の線量率を高く設定することで像質の向上を図った。当初の線量率は 6Gy/min at 1m であり、材厚 t240mm 程度までは評価可能な透過像を得ることができたがそれ以上は限界であった。次の試験では、12Gy/min at 1m に線量率を増すことで t350mm の材厚まで観察が可能なことを確認した。今回の試験では、さらに出力を上げ 20Gy/min at 1m まで線量率を高めることで増質が改善できた。

直線加速器の定格は最大 30Gy/min at 1m まで上げることができるため実使用ではさらに像質の改善が期待できる。

(3) 最新 CR 機材の適用と各ディテクタの比較

現在、当社が所有する CR 装置は、軽量コンパクトで現場出張用に 8 年前に導入したものであるが、最新型のものと比較し読取機構の分解能が高いものではない。

上記の理由により本試験では、一般社団法人日本溶接協会 AN 研究委員会(非破壊試験技術実用化研究委員会)の協力を得て、富士フィルム社製の最新 FCR (FUJI Computed Radiography) 装置を借用し 9MeV の試験を実施した(**図 15 ~ 図 19** 参照)。

CR による画像では、DDA に比べ像質が低く、高エネルギー領域では高感度の特性は発揮されないことを確認した。また材厚の増加に伴い DDA では積算回数も増えるため、DR の露出時間は FILM と同程度の時間を必要とする。

5. 今後の課題

今回の試験研究では、DDA による放射線透過試験において、X 線装置の出力を上げることで、材厚 400mm 近傍の試験体の透過像が得られ、評価できることがわかった。また、高エネルギー領域では、高感度が特徴の CR が最も露出時間が掛かることが明らかになった。

当社が使用する高エネルギー X 線発生装置 0.95 ~ 9MeV を用いた DR についての基礎的なデータを得ることができた。これらの知見が DR 適用と業容拡大に資すればと考えている。

今後は、DR の普及と活用の拡大など社会情勢の変化に対応するため、試験条件の改善や最新の機材による試験を通じ知見の拡充と技術の蓄積を図る必要があると考える。現在、日本溶接協会からの AN 研究委員会からは、知見の共有⁽⁸⁾などと共に散乱線防止に関するアイデアなどの助言をいただいている。それらの助言を今後の試験に反映し、さらなる知見の拡充を進める予定である。

謝辞

本試験を実施するにあたり、日本溶接協会 AN 研究委員会関係者の皆様には多くのご指導とご協力をいただきましたことを記し、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 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
- (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) 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
- (4) 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
- (5) JIS Z 2307:2017:放射線透過試験用複線形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
- (6) N. Ooka, M. Takita, K. Yokota : Application of Digital Radiographic Testing Techniques to Thick Material using High-energy X-Ray, 15th APCNDT 2017
- (7) K. Bavendiek et al. : Best Energy Selection for Different Applications with Digital Detector Arrays from 20 to 600 keV, Materials Evaluations, 70 (8) , 2012, pp.965-974
- (8) The Japan Welding Engineering Society : Non-destructive Test Application Research Committee: Basics and Applications of Digital Radiography in Industrial Fields, 2014

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

東京都立産業技術研究センター
(AN 研究委員会 TF メンバー)
河原 大吾
TEL. 03-5530-2111
FAX. 03-5530-2765

一般社団法人日本溶接協会
(AN 研究委員会 TF 顧問)
大岡 紀一
TEL. 03-5823-6324
FAX. 03-5823-5244

元株式会社 IHI キャスティングス
(AN 研究委員会 TF メンバー)
根本 好弘
TEL. 03-5823-6324
FAX. 03-5823-5244