

圧力容器関連法規と非破壊検査

Pressure Vessel's Code and Non-destructive Inspection

化工機事業部 品質保証室
 小 蘭 利 男
 Toshio Kozono
 (化)生産管理第2課
 青 井 宏 安
 Hiroyasu Aoi

In manufacturing welded metal products such as pressure vessel, etc., examinations/inspections are carried out as a means for quality control and quality assurance, one of the essential items of which will include "Non-destructive examination/non-destructive inspection". The judgement criteria for non-destructive inspection, used for evaluation of quality for the purpose of quality control and quality assurance, will indicate the control limit for quality control. As to the weld, for instance, the non-destructive inspection conducted at the time of manufacturing will not be intended to detect a failure for repair, but to evaluate the quality of weld through the defects detected for control of welding execution so that the weld quality can be controlled properly.

There is another non-destructive inspection which is conducted after starting the operation for evaluation of life, however, the considerations will be made in this paper on the "Non-destructive examination/non-destructive inspection" from the stand point of a pressure vessel manufacturer.

えがき

圧力容器に対しては各国とも古くから特別の法規を定それに基ついで検査制度を敷いている。これは圧力容が破裂危険性を潜在的にもっているからである。化学工などで使用される圧力容器の中には、引火性、可燃性あるいは有毒性の蒸気やガスを発生するものもある。このよ

な場合には、破裂危険性に更に爆危険性、有害危険性が付加されるとになる。しかしながらこの爆危険性及び有害危険性については内物によるファクターが大きく、圧容器的な特性とは若干異なる。

一口に圧力容器といっても蒸煮、精練器のたぐいから熱交換器、応器さらには原子力容器に至るまその種類はきわめて多く、サービ条件も区々で1 kg/cm², 120 °C いった程度のものであれば、最近では1500 kg/cm², 500 °C のよう高圧、高温の使用条件をもつもの実用に供されている。

圧力容器は近代産業には欠くことできないものであり、産業の進展共にその設置数は増加の傾向をたっている。また、容量は漸次大型し、構造は複雑化している。使用料も新しいものがつぎつぎと開発れ、工作方法はリベットから溶接、その溶接も最近ではアーク溶接ほかにエレクトロスラグ溶接・電ビーム溶接などが採用されるに至っている。更にバイオテクノロジー、ファインケミカル分野での技術な模索も積極的に進められてお

り、技術的にも品質的にも安全性の面でもより高度なものが要求されてきている。これらのことからその品質レベルを保証し、最も経済的にしかも要求された性能を満足させるための技術として非破壊試験・非破壊検査の果たす役割りは非常に大きなものとなってきた。

ここでは当社の圧力容器製造における関連法規とその中

第1表 各国における圧力容器の規制状況

Table 1 Current regulations for pressure vessel in each country

Countries	National regulations		Regulation planning institute	Supervision	
	Names	Scope of application		Institute responsible to execution	Submission of drawings
Germany	Dampfkessel Bestimmungen (W. U. B.) AD Merkblätter	Boiler Unfired pressure vessel	Technische Überwachungs Vereine (T. Ü. V.) Technical inspection union	T. Ü. V.	Drawings need to be submitted to T. U. V. for approval prior to installation.
England	Lloyd's rules	Boiler and unfired pressure vessel	Lloyd's register of shipping	Lloyd's register of shipping	Drawings need to be submitted for approval prior to installation.
	British standard B. S. I, 113 B. S. I, 500 B. S. I. 515	Boiler Welded pressure vessel Welded pressure vessel	British Standard Institution	None	Drawings are approved by purchaser of boiler or pressure vessel.
U. S. A.	A. S. M. E. code (Standard of American Machine Association) (*1)	Boiler and pressure vessel	American machine association	Inspection institute in state or city employing standard	Drawings need not to be submitted to state or city, but reviewed by authorized inspector.

で規定されている非破壊試験・非破壊検査について特に技術的な面での比較をしてみる。

1. 圧力容器関連法規とその適用区分

圧力容器の破裂危険性はその種類によって若干異なる。従って法規上も圧力容器を破裂危険性によっていくつかの範囲に分け規制の態様を変えている。

国内関連法規を見てみると圧力容器に適用される法規としては、ボイラ及び圧力容器安全規則、火力発電設備に関する技術基準、原子力発電設備に関する技術基準、高圧ガス取締法などいろいろある。

2. 圧力容器に適用される構造規格

圧力容器はその使用過程において生ずる応力に対し十分な強度を保有すると共に、過度の変形を生じないよう一定の剛性を備えなければならない。このため各国は圧力容器についての構造規格を定め、強度計算法をはじめ、材料や工作、安全装置などの基準を設定している。第1表に各国における圧力容器関係の規制状況を示す。

これらの構造規格に定める強度計算や許容応力は第2表に示す通りであり、次の2通りの考え方がある。

- (1) 蒸気圧力による応力を算定し、最大主応力（引張強さの $\frac{1}{4}$ または降伏点の $\frac{2}{3}$ ）内におさえる。
- (2) 蒸気圧力による薄膜応力のほか、局部応力や曲げ応力、機械的荷重や温度差によって生じる二次応力、さらにはピーク応力をも解析し、疲労破壊を考慮して耐用年数を定める。最大せん断応力説を採用し、（最大主応力－最小主応力）を応力強さと定義し、これを許容応力以下におさえる。この方法によると構

造材の厚さを薄くすることができるが、そのかわり材料、溶接、検査などについて厳しい基準が定められている。

(1)の方法は現在多くの国で採用されており、わが国の圧力容器構造規格もこの方法によっている。(2)の方法を採用した代表的な規格は ASME 規格の Section III (Rules for construction of nuclear vessels) と Section VIII

第2表 各国における胴の強度計算式、許容応力および溶接継手の効率（常温における内圧を受ける場合）
Table 2 Strength calculation formula/allowable stress of shell, and efficiency of welded joint in each country (in case internal pressure is applied under normal temperature)

Countries	Gede names	Calculation formula used for calculation of shell thickness	Allowable stress (σ_a)	
			Tensile strength standard	Yield point standard
Germany	Werkstoff nuch Banvor-schriften (Boiler)	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta - P}$		2/3
	AD-Merkblätt Bl (Pressure vessel)	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta}$		2/3
England	Lloyd's standard (Boiler)	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta} + 0.06 \text{ in.}$	1/4	
	Lloyd's standard (Pressure vessel)	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta} + 0.06 \text{ in.}$	1/4	
	B. S. standard B. S. 1500	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta - P}$	1/4	
U. S. A.	A. S. M. E. standard section-I(Boiler)	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta - (1-y)P} + 0.1 \text{ in}(*3)$	1/4	
	Section-III (Pressure vessel) Division-1	$\frac{PDi}{200 \sigma_a \eta - 1.2 P}$	1/4	

第3表

磁粉探傷試験、浸透探傷試験、電磁誘導試験の比較

Table 3

Comparison of magnetic particle test/Dye penetrant test/Electromagnetic induction test

Principle		Magnetic particle test	Dye penetrant test	Electromagnetic induction test
		Adhesion of magnetic particle to defective leak field	Penetration of liquid to gap	Electromagnetic induction and change in leak current
Intended materials	Metals			
	Ferromagnetic metals	○	○	○
	Non-magnetic metals	×	○	○
	Non-metal materials	×	○	×
Intended defects	Surface defects			
	Opening	◎	◎	◎
	Non-opening	◎	×	◎
	Under-surface defect	○	×	○
Defect data	Defect data			
	Length	○	○	△
	Crack depth	△	△	○
	Discrimination of defect type	○	○	△

Notes: ◎.....Increased detection sensitivity

○.....Applicable

△.....Difficult at present

×.....Impossible

表 4
放射線透過試験と超音波探傷試験の比較
Table 4
Comparison of radiographic test/Ultrasonic flaw test

Test procedures		Radiographic test (Direct radiographic method)	Ultrasonic flaw test (Pulse reflection method)
Principle		Difference in density on film due to difference in radiation quantity between sound part and defective part	Reflection of ultrasonic wave due to defect
Intended defects	Volume defect	◎	○
	Plane defect	○ (Having depth to irradiation direction) △ (Having inclination to irradiation direction)	◎ (Having vertical extension in ultrasonic wave) ○ (Having inclination against ultrasonic wave)
Defect information	Type	◎	△ (Flaw test from multiple directions)
	Dimensions	Length	◎ (Volume defect) ○ (Plane defect)
		Height	△ (Method to change irradiation direction/Method by difference in density)
	Position (Depth)	△ (Method to change irradiation direction)	◎

表 5 各規格における溶接部に対する非破壊検査の概要
Table 5 Outline of the nondestructive testing of welded joints in each standard

Division of NDE	Structural standard of pressure vessels	Inspection regulation on specific equipment	JIS B8243	ASME sec. VIII, div. 1
RT	Objective of 100 % RT (1) Welded joint for pressure vessel which requires air-tightness to keep harmful substance (2) Welded joint for carbon steel shell, end plate, etc. of which thickness exceeds 38 mm	(1) Butt-welded joint for poisoning gas equipment (2) Longitudinal/Circumferential joint for multilayer shell	(1) Welded joint for vessel to keep fatal dosage (2) Welded joint for carbon steel shell, end plate, etc. of which thickness exceeds 38 mm	(1) All butt-welds for shell and end plate of vessel to keep fatal dosage. (2) Butt-welds for shell and end plate of vessel of which thickness exceeds 38 mm
	Objective of partial RT (20 %) Welded joint similar to longitudinal/Circumferential joint other than 100 % Rt (Excluding carbon steel welded joint of below 9 mm, designated by the director of the standard bureau)	(20 %) Butt welded joint to which 100 % RT is not required, except for the following welds (1) Joint designed not to be subjected to RT (2) Weld to be applied with external pressure only	(20 %) Same as specific equipment	(One pc. for every 15 m, 150 mm : min.) Same as specific equipment
JT	No regulation	(1) Longitudinal/Circumferential joint for carbon steel vessel of which thickness is more than 75 mm (2) Longitudinal/Circumferential joint for low alloy steel vessel of which thickness is more than 50 mm	(1) Joint which requires 100 % RT but of which 100 % RT is hard to apply (2) Weld which is proved to require RT, depending upon material, inspection, structure, use condition, etc.	(1) Where satisfactory RT result is not assured, RT may be used in substitute for UT. (2) Welds of ferrite executed by electro-slag welding, electro-beam welding
MT/PT	Objectives of MT/PT (1) Aluminum, aluminum alloy and titanium welds where RT is not applicable	(1) Weld or jig trace of material specified in JIS G3115, G3120, G3126, G3127 and other equivalent materials (2) Weld or jig trace of high-tension steel, steel for low-temp. use or low alloy steel (3) Welds of vessel which requires 100 % RT, to which opening, reinforcing, material, pipe stand, etc. are mounted	(1) Welds of vessel with its permissible tensile stress designed to yield point or value 0.5 times of 0.2 % resistance in accordance with JIS G3115, G3116 or equivalent (2) Accessories (Opening, reinforcing material) fitting welds for pressure vessel which requires 100 % RT.	(1) Corner weld of flat plate of which thickness exceeds 1/2" (Before and after welding) (2) All welds around opening, and of mounting equipment to be subjected to barometric pressure test (Throat thickness of over 1/4") (3) All welds of high tension steel, and after removing tack welding

Remarks: RT.....Radiographic testing
MT.....Magnetic particle testing

UT.....Ultrasonic testing
PT.....Penetrant testing

第 6 表 国内における非破壊検査認定技術者の種類と資格の内容
Table 6 Kinds/Qualification contents of domestic authorized NDT engineers

	Special grade	Grade-1	Grade-2	Grade-3
NDI	Special grade non-destructive test engineer	Grade-1 radiographic test engineer Grade-1 ultrasonic test engineer Grade-1 magnetic particle test engineer Grade-1 dye penetrant test engineer Grade-1 electro-magnetic induction test engineer Grade-1 torsion measurement engineer	Grade-2 radiographic test engineer Grade-2 ultrasonic test engineer Grade-2 magnetic particle test engineer Grade-2 dye penetrant test engineer Grade-2 electro-magnetic induction test engineer Grade-2 torsion measurement engineer	Radiographing engineer ultrasonic thickness measurement engineer Inter-pole type magnetic particle flaw test engineer solvent removal dye penetrant test engineer
CIW	Senior inspection engineer	Senior test engineer	Junior test engineer	

(Pressure vessels) の Division 2 (Alternative rules for pressure vessels) である。

ISO (国際標準化機構) の TC11 (第11技術委員会) では目下、圧力容器の国際規格案の検討を行っているが、この案では圧力容器を3つに区分している。このうちA容器に対しては ASME の Section III と同じように応力解析や材料、工作などについての厳しいコントロールを前提として高い許容応力が認められている。

以上のように一次応力や二次応力についての解析が行われ、かつ、材料や工作についても厳しい規制がなされる場合には高い許容応力を認めても安全性が阻害されることはなく、従って、応力解析と非破壊の技術が進み、材料工作の品質管理が徹底すれば、圧力容器をいくつかの範囲に分けて別個の規格を適用することは妥当なことと考えられる。

3. 各種関連法規に見る非破壊検査

3.1 非破壊検査の適用

非破壊検査は「欠陥の検出」と「歪測定」とに大別されるが、ここでは前者の「欠陥の検出」に焦点をあててみる。欠陥の検出には主として表層部の欠陥を対象とする方法と、内部欠陥を対象とする方法がある。表層部の欠陥検出に適した方法としては磁粉探傷試験、浸透探傷試験、電磁誘導試験があり、これらを比較すると第3表に示す通りとなる。また内部欠陥に適した方法には放射線透過試験、超音波探傷試験などがあり、これらを比較すると第4表に示す通りとなる。

3.2 溶接部に対する非破壊検査の要求

圧力容器の溶接部に対する非破壊検査は設計条件や使用材料などによって大いに異なる。ここでは当社においてよく適用される圧力容器構造規格、特定設備検査規則、JIS B 8243, ASME Code Section VIII-Div. 1 について、その概要を第5表にまとめる。ただし、この第5表に示した内容は規格の要求事項を完全に網羅したものではなく、例えば放射線透過試験における100%の要求範囲は使用材料の種類によって板厚範囲などが異なるというように、実際の適用に当っては各々の規格への適合と製造条件、更には使用条件との兼ね合いで吟味していく必要がある。

3.3 非破壊試験技術者の資格

非破壊試験の目的を達するためには、それを行う技術者が一定水準以上の知識と技術及び人格を有し、試験結果に

対して正しい判断を下す必要がある。また、同一の規格、同一の要領書、または手順書に従って行う非破壊検査であるならば、だれが、いつ、どこで何度行っても、同じ結果が得られなければならない。このためには非破壊検査技術者の技量レベルを一定にしておく必要がある。

この非破壊検査技術者の資格認定については、日本に代表されるように中立的な第三者機関により試験を実施して資格認定を行う場合と、米国の ASME に代表されるように米国非破壊試験協会 (American Society for Nondestructive Testing) によって示されているガイドライン (SNT-TC-1A) に沿って作成された Written Practice に基づき、その企業において経営責任を有している人が非破壊検査を実施していく上での中心的な人物 (レベルⅢ非破壊検査員と呼ばれる。) をまず任命し、そのレベルⅢ非破壊検査員が実際に非破壊検査の実施に当る下位のレベルの者の教育・訓練・資格認定を行うという「社内認定方式」がとられる場合とがあるが、制度としては一長一短がある。

3.3.1 日本国内の場合の資格認定制度

日本国内では(社)日本非破壊検査協会(略称NDI)が中立的な立場で、技量認定試験を実施し資格認定している。

1) 資格の種類

認定された技術者を総称して非破壊検査認定技術者というが、その資格は第6表に示す。

2) 資格の内容

(1) 非破壊検査特級技術者

非破壊検査技術全般について、第6表に示した事項を実施することができる広範な知識と経験を有し、かつ管理者として十分な能力を有する者

(2) 1級技術者

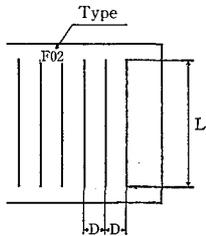
該当する技術部門について、第6表に示した事項を実施することができる高度の知識と経験を有し、かつ指導者としての能力を有する者

(3) 2級技術者

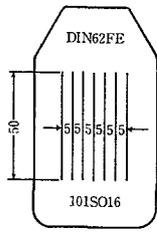
該当する技術部門について、第6表に示した事項を正しく実施できる者

(4) 3級技術者

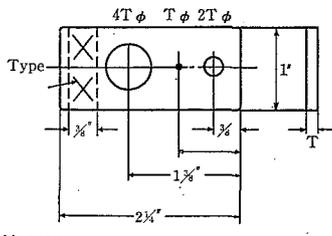
該当する技術部門について、第6表に示した事項を正しく実施できる者



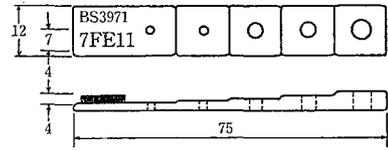
第1図 Z3104における針形透過度計
1 Needle type penetrator (JIS Z3104)



第2図 DIN規格における針形透過度計
Fig. 2 Needle type penetrator (DIN)



第3図 ASTM規格における有孔形透過度計
Fig. 3 Hole type penetrator (ASTM)

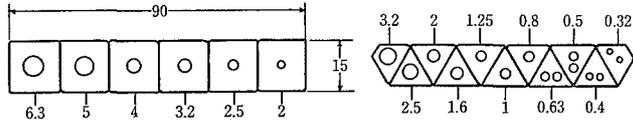


第4図 BS規格における有孔階段形透過度計
Fig. 4 Hole/Stepwedge type penetrator (BS)

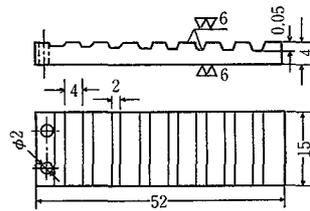
表 像質計 (透過度計) の種類

表 7 Kind of image quality indicator (Penetrator)

Shape	Standard/Code	Material
Needle type	JIS	Steel, Aluminum, Stainless steel
	DIN	Steel, Copper, Aluminum
	BS	Steel, Copper, Aluminum
Needle type	ASTM	Steel, Copper alloy etc.
	MIL Ministry of international trade & industry departmental ordinance No. 81	
Hole/Stepwedge type	BS AFNOR	
Notch	GOST	



第5図 AFNOR規格における有孔階段形透過度計
Fig. 5 Hole/Step-wedge type penetrator (AFNOR)



第6図 GOST規格における有孔形透過度計
Fig. 6 Hole type penetrator (GOST)

内ではこのほか(社)日本溶接協会溶接検査認定委員略称C I Wが規格WE S 8701「溶接構造物非破壊検査業者の技術種別基準」に基づいて第6表のように技量を3つに分けて、技術者の技量を認定している。

2 ASMEにおける資格認定制度

国法規,特にASMEに代表されるものではASNT(American Society for Nondestructive Testing)のSNT-TC-1Aの内容による。

資格の種類とその内容

Recommended Practice No. SNT-TC-1Aでは資格のレベルとしては基本的には3段階に分けるように規定しているが、非破壊検査業務を遂行していく上で、必要があれば細かく分類してもよいとしている。

NDTレベルⅠ

NDTレベルⅠ検査員は試験装置の調整,試験,指示書に基づく評価,記録の作成などの非破壊検査業務を適切に行うことができない。NDTレベルⅠ検査員はNDTレベルⅡ検査員またはレベルⅢ検査員の指導,監督の下に作業を行う必要がある。

NDTレベルⅡ

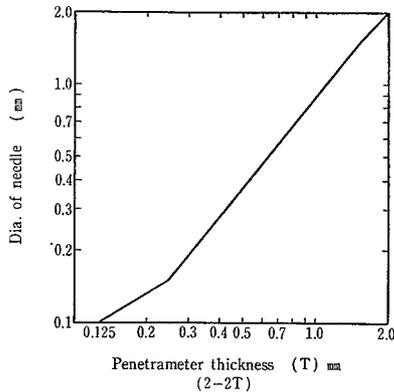
NDTレベルⅡ検査員は試験装置の組み立て及び調整,当該規格における標準,仕様書などに基づいて評価・判定ができない。またレベルⅡ検査員は試験の適用範囲を十分熟知し,訓練を受ける者やNDTレベルⅠ検査員の指導を行う責任がある。このレベルⅡ検査員は非破壊検査における指示書・計画書及び報告書が作成できない。

(3) NDTレベルⅢ

NDTレベルⅢ検査員は試験方法の確立,規格,標準仕様書の翻訳,適用すべき非破壊検査方法の選定ができなければならない。また更にNDTレベルⅢ検査員は非破壊検査業務全般にわたって統括する責任があり,規格,試験,仕様書に基づき試験結果の評価ができるばかりでなく,他に有効な試験方法のない場合に最良の方法とその判定基準を設定する上で必要となる材料,製造及び応用技術に関して十分な知識を有しておく必要がある,非破壊検査方法全般にわたって熟知していることが望ましい。

3.4 放射線透過試験における試験条件と欠陥検出度

圧力容器を製造する場合においては,ほとんどの場合法規の適用を受けて「放射線透過試験」を実施することになる。この放射線透過試験は試験材に欠陥があった場合,欠陥部と健全部の間に放射線吸収の差を生じ,透過した放射線によってフィルム黒化度に差を来す。その2次元的な模様から欠陥の放射線に直角方向の形状情報を受け,欠陥部の濃度から放射線の進行方向における寸法の情報を得るという試験方法である。しかし,試験材の放射線透過厚が大きくなると放射線の吸収が増し,現実には高エネルギーの放射線を使用しなければならなくなる。その結果放射線方向の寸法が同じでも,試験体の厚が大きくなると欠陥部の濃度と健全部の濃度との比が小さくなる。それゆえに我々の肉眼によって識別できる濃度差の絶対値は一定に近いたため,厚いものを高エネルギー放射線が撮影した場合は,薄いものを低エネルギー放射線で撮影した場合より検出できる欠陥が大きなものではないと検出できない。しかもこれらの状況は放射線のエネルギーの他にフィルムの種類,増感紙その他によって変化する。



第7図 ASTM形透過度計とJIS形透過度計の対応
Fig. 7 Corresponding to ASTM type penetrator and JIS type penetrator

以上のように放射線透過試験においては、各国法規における違いは撮影技術とか撮影テクニックにあるのではなく、欠陥検出度を正しく評価するために、撮影後におけるフィルム評価をどのように行うかというところに考え方の大きな違いがあるように思われる。

でき上がった透過写真のフィルムが、試験体の内部状態をどの程度写し出しているかは極めて重要なことである。そこでこの透過写真の像質を評価するために像質計を用いる。この像質計は日本では透過度計(Penetrator)と呼び、最近の世界の大勢は像質計(Image quality indicator)と呼んでいる。これは透過度計の識別度がいかにも欠陥そのものの識別度であるかのような錯覚をおこし易いために、I I WによりI. Q. Iと変更したものである。従って像質計は写し出された像の良否を判定するだけのものと考えておく必要がある。

3.4.1 像質計(透過度計)の種類とその構造

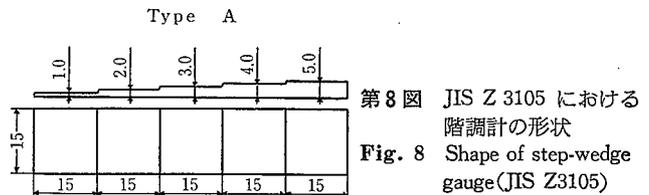
像質計(透過度計)に使用する材料は試験体と同材質または同等の材質で製作することが原則となっている。像質計(透過度計)の種類は試験体と同じ材質の直径の異なる針金群をゴムまたは合成樹脂などの板に埋めこんだものを使用する針金形、直径の異なる穴をあけた板を使用する有孔形、穴をあけた階段状のブロックを使用する有孔階段形及び各種の深さの溝をつけたブロックを使用する有溝形などがある。各国規格における代表的なものを分類の上、第7表及び第1~6図において示しておくことにする。透過度計識別度は、材質で識別できる最小の透過度計の呼び厚さ、または呼び線径を除いた100分率の小数点以下2桁目を切り上げて算出する。大半の規格において透過度計識別度は2.0%を標準としている。

$$\text{透過度計識別度} = \frac{4X}{X} \times 100 \% \quad (1)$$

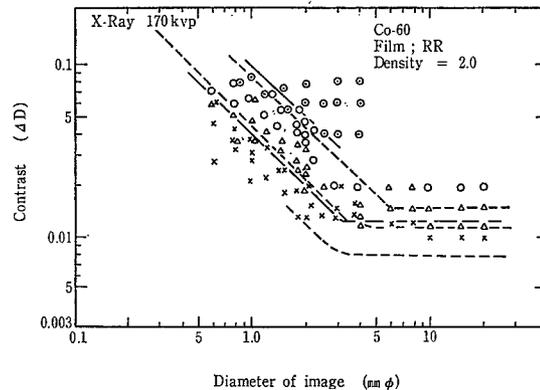
ASTM形の透過度計では板厚の2倍の径(2T)を有する孔を標準として、透過度計板厚が試験の1%の場合を1%(1-2T)、2%の場合を2%(2-2T)、4%の場合を4%(4-2T)と定義している。もし他の孔が識別限界にあるときは識別度を次の式より求める。

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} \quad (2)$$

ここで S_1 は既知の透過度計識別度、 S_2 は求めようとしている識別度、 N_1 は S_1 に対する倍数で透過度計の厚



第8図 JIS Z 3105 における
階調計の形状
Fig. 8 Shape of step-wedge
gauge (JIS Z3105)



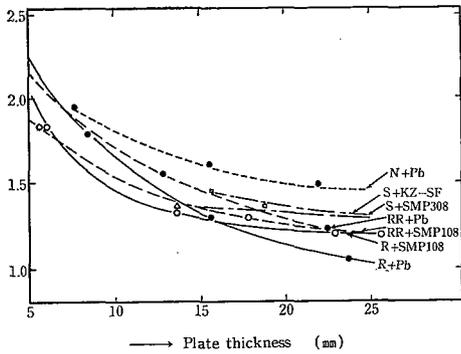
第9図 有孔板形像質計の像の直径と識別限界濃度差の関係
Fig. 9 Relations hole image diameter of hole/Plate type
penetrator and discriminating maximum density
difference

さの何倍の径の穴の像が見えるかを示す数字で、 N_2 は S_2 に対するその倍数である。たとえば2%(2-2T)のとき $S_1=2$ 、 $N_1=2$ とすると、いま $N_2=4$ のとき、すなわち(2-4T)で4Tの穴の像しか見えないとき S_2 は $2\sqrt{2}=2.8\%$ となる。また1%(1-2T)であるが、その1Tの穴が見えたときは何%とするかは $S_1=1$ 、 $N_1=2$ であり、 $N_2=1$ であるから $S_2=1\sqrt{2}=0.7\%$ となる。しかし、このような表示方法ではいかにも検出し得る欠陥の大きさとの関係があるようにとられるためAFNOR、またはDINなどでは材厚と直接何の関係もない数値で像質を示す方法をとっている。

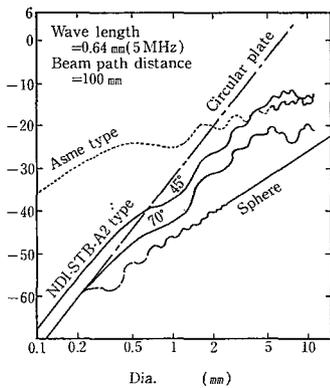
以上のようにいろいろな像質の表示方法があるが、異なった像質計であるので、識別度の数字が同一でもすべて同一像質とはいえない。もしその対応を求めるならば、それらの像質計を同時に入れて撮影してその対応を求める必要がある。一例としてJISとASTM(ASME)とを比較すると第7図のようになる。

3.4.2 階調計(線質計)

JISにおける特色の一つは階調計を使用することにある。これは同一の透過写真を同一の方法で観察しても透過度計の本数に2~3本の個人差が現われる。従って同一の写真でも観察者によって合格となったり不合格となったりすることもある。また普通級の撮影では材厚5 mm以上、特級の撮影においては6.6 mm以下の溶接部では0.1 mmの線が認められればよいことになっている。従って2~3 mmのものであれば、よほど悪い撮影をしても0.1 mmの線影が認められる。割れの検出度は透過度計識別度が同じでも相当異なる。従ってこれらの欠陥検出度をよくするためには、単なる透過度計識別度だけでは欠陥の検出度を規定できない。そのためJISでは撮影する線質を規定するため階調計(線質計)を使用することになっている。すなわち階調計は厚さが1 mmずつ変化している部分の濃度を



0 図 X線フィルム, 増感紙の組合わせによる透過度計識別度
 . 10 X-Ray film, screens and penetrameter sensitivity



第11図 斜角探傷における反射率
 Fig. 11 Reflection ratio in angle beam method

ましているもので、この濃度差はX線フィルムと増感紙種類、現象条件、フィルム濃度、放射線装置の種類、管E、および散乱線量の変化によって異なる。このため階調を使用することで、できるだけ良好な撮影条件を変え、ようにしている。参考までにJIS Z3105における階調と第8図に示しておく。

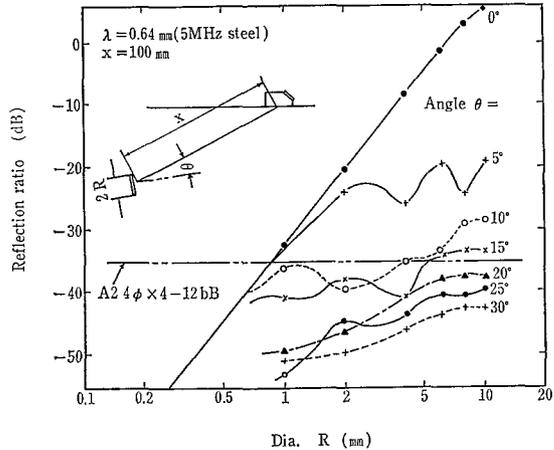
3 像質計(透過度計)の識別度

欠陥の検出度を求めるには像質が一定の水準に達しているフィルムについて論じなければならない。その水準を表すのに透過度計の識別度を考えるが、実際に技術的には何程度までの欠陥が検出できるかということについてある程度知っておく必要がある。

透過写真上で像で識別できるか否かは像のコントラストフィルムの粒状性、ボケなどが関係し、像のフィルムの面積が小さいときにはコントラストが大きくなれば出できない。いま識別限界濃度差 ΔD が像の大きさによってどう変化するかを円孔形透過度計で求めた結果を第9図に示す。この図は幾何学的ボケが問題にならないような半径にして求めたもので、針金や円孔の幅は最高濃度の半径をとったもので、これは透過度計の実寸法にほとんど一致することが確かめられている。

また円孔形では識別できる限界は、円の中心を通る断面が一定のものについては同じである。第7図を見ても分るように、ある程度径が大きくなると、識別できる濃度差一定になる。

以上のように実際に線形の透過度計によって、いろいろフィルム及び増感紙を組み合わせて撮影し、その識別度求めた結果が第10図である。これらによればある厚さに



第12図 円形平面傷の傾きが傷の反射率に及ぼす影響
 Fig. 12 The effects of the slant of circular plane discontinuity

なれば、規格を満足する写真撮影も困難なものではなく、放射線透過試験によって、欠陥を検出する場合、まず写真そのものの質を示す透過度計の識別度がある規定以上のものを撮影してから論じなければならない。

3.5 超音波探傷試験における試験条件と欠陥検出度

超音波によってどの程度の欠陥まで検出できるかというのは、放射線透過試験以上に困難な問題が多い。それは超音波探傷法は音波の欠陥による反射を捕えて欠陥の存在を検出する方法であり、目的はその材料の強さを保証することに使用する場合が多いので、欠陥エコーを捕えると共にそのエコーを発生する欠陥の性状を知り得なければ意味が無く、現在のところ無理なことが多い。しかし、欠陥による音波の反射率、欠陥の拡がり等の問題について明らかにし、超音波探傷試験そのものの特性から欠陥の検出限界についての問題を考えてみることにする。

3.5.1 反射率における評価

欠陥エコーは欠陥による音波の反射によるものであるから、その反射率が大きな因子となる。

第11図は斜角探傷した場合の反射率を、ASME形およびA2の標準試験片の人工欠陥と円板及び球とに比較して示したものである。

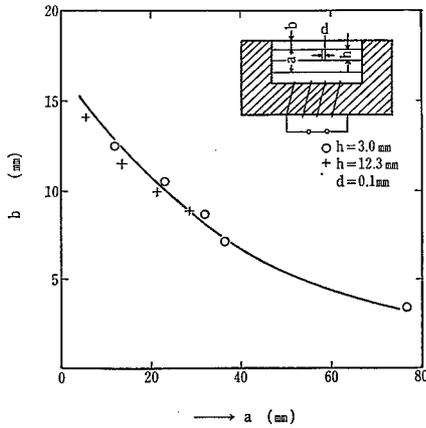
欠陥エコーの高さ(F)は減衰率にも関係するので底面エコーBとの比F/Bで相対的に示す方法も採用されている。このBの値に健全部または欠陥部の値を用いることがある。これをBG, BFで示す。このF/Bとの欠陥の大きさの対比も求められている。Fの値が大きくなるとF/BFとF/BGの値は差が大きくなる。

3.5.2 欠陥の方向性による欠陥

圧力容器の溶接線などに実際に出現する割れなどの欠陥は、超音波の入射方向に対していろいろ傾いているのが普通であり、従って欠陥の法線と θ なる方向から一探触子によって探傷した場合の反射率を求めてみると次のようになる。

$$\gamma = 2 \sin \frac{\pi R^2}{\lambda x} \cos \theta - \frac{2J_1(2kR \sin \theta)}{2kR \sin \theta} \quad (3)$$

ここで $k = (2\pi/\lambda)$



第13図 直流極間法による内部欠陥の検出度
Fig. 13 Sensitivity of internal discontinuities by the direct current electromagnetic yokes technique

Rは円板の半径， λ は波長， x_1 は探触子から欠陥までの距離

第12図は5 MHzで10 cmのところにある円形平面傷を斜角探傷する場合の傷の反射率を(3)式を用いて計算したものである。この図によれば傾きの影響は大きい。すなわちSTB-2Aの $4\phi \times 4$ より12 dB低いところの線より20°も傾けば低くなるので、検出できなくなる。

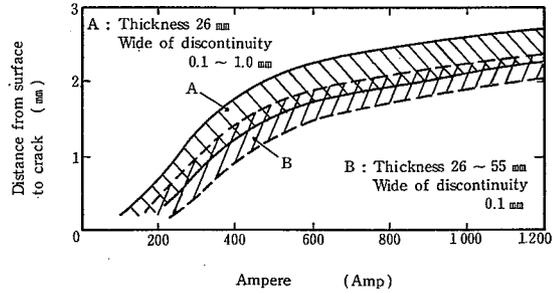
以上のようにビームに対して傾いた平面傷は検出困難であるから、割れの検出は特別に好都合な場合しかできないことになる。そのため一つの屈折角では不十分な場合があり、45°と70°のように2種類の屈折角のものを使用することがよいとも言われている。しかし、割れの場合は直線的な平面でないから角度の割りに検出の可能性もある。

3.5.3 探傷感度の問題と評価の対象とする欠陥とその検出度

探傷感度の調整は超音波探傷における基本となるものであるが、JISでは標準試験片もしくは対比試験片における人工欠陥を利用して行うように規定しているのに対して、ASMEなどの外国法規では板厚、曲率、材質等に応じて対比試験片を作成し、その人工欠陥を用いており、より実際的ということではASMEなどの考え方の方が合理的と思われる。

一方、評価の対象とする欠陥については引用規格あるいは、要領書により定められた検出レベルにより対象とする検出レベルが規定されているが、通常ASMEなどで20% DAC (JIS H線-14 dB相当)以上を対象としており、国内法規を適用する压力容器では、ほとんどの場合M検出レベルを選定するようになってきている。しかし、欠陥とエコー高さの対応は必ずしも良いとは言えず、この選択は難しい。一般に有害な割れや溶け込み不良はエコーが高いとされているが、割れであっても方向によっては3.5.2.項で述べたように反射率が思った以上に小さくなってしまふ場合がある。このことは常に考慮に入れておかねばならない。

現在は規格のほとんどがエコー高さ依存による合否判定を取り入れているが、実際には、妨害エコーと判別できるエコーであれば、ノイズと分解可能な限りほとんどのエコーは何らかの欠陥からの信号であり、球状欠陥以外はエコーの高低にかかわらず、欠陥指示長さに対応して欠陥が存



第14図 交流直接通電法による内部欠陥の検出度
Fig. 14 Sensitivity of internal discontinuities by the alternating current direct contact technique

在すると考える方が順当と思われる。

3.6 磁粉探傷試験における試験条件と欠陥検出度

磁粉探傷試験は鉄鋼材料の表面近傍の欠陥を検出するのに適した方法であり、その原理は磁化された金属の表面近傍に欠陥の存在することにより漏洩磁束が現われ、この磁束を検出して欠陥の存在を推定することにある。

3.6.1 表面割れの検出限界

磁粉探傷試験における欠陥検出限界はいろいろな因子によって左右されるが、磁粉が微細であり、他の因子によって妨げられなければ検出限界は無いとも言われている。すなわち厳密に言えば結晶粒界は結晶学的に言って不連続箇所であり、転位などの多い箇所、広い意味での欠陥ともいえるため、強さの上でも結晶粒より小さい欠陥は現実の欠陥として取り扱ってはいない。従って磁粉によって強磁性体内の結晶中にある磁区模様も検出できるので、欠陥以下のものも検出できることになるからである。

3.6.2 内部欠陥の検出限界

内部欠陥についてどの程度の深さまで検出できるかが問題である。特に当社の場合はグラスチール製機器におけるノズル取付溶接部の品質検査に磁粉探傷試験を適用しているが、表面近傍に存在するブローホールなどの欠陥を見落すことがあれば、焼成工程においてガラスをライニングした時に、ガラスの中に気泡等が発生する原因にもなるからである。従って表面からできるだけ深い位置の欠陥まで検出できることが望ましい。グラスライニング性の問題からいえば表面から5 mm程度までの欠陥検出ができることが望まれる。

これまで内部欠陥の検出度については実際の割れについての実験は試されていないが、人工欠陥についてのものではR. Bertholdの行ったものがある。直流極間法によるものでbの厚さとaの厚さの関係を求めたものがあるが、そのグラフを第13図に示す。欠陥の奥行きについては3 mm及び12.3 mmの2種類で検討しているが、これによると欠陥の奥行きは検出できる表面からの深さには影響が無いことを示している。

交流を用いて直接通電法による実験をした結果を第14図に示す、これによれば欠陥の幅や、材料の厚みを変えても検出できる深さはほとんど変わらないことを示しており、せいぜい2 mm程度の深さまでしか検出できず、直流の場合に比べて非常に浅いことを示している、

同じ交流磁場を用いて探傷する場合、湿式より乾式磁粉

8 表 ASTM E-165-7 による浸透時間と現像時間
 8 表 Penetration time/Development time in accordance with ASTM E-165

Materials	Types	Type of defects	Penetrants for all methods	
			Penetration time	Development time
Aluminum, Magnesium, Iron steel, Brass/Bronze, Titanium/Heat resistant alloys	Forging-casting welding	Cold-shut, Porosity, Melting failure, Crack (All types)	5 min.	7 min.
	Extrusion rod, Forging, Plate	Lap, Crack (All types)	10 min.	7 min.
Tool with carbide tip		Melting failure, Porosity, Crack	5 min.	7 min.
Cast iron	All types	Crack	5 min.	7 min.
Steel	All types	Crack	5 min.	7 min.
Cast steel	All types	Crack	5 min.	7 min.

用いた方が表面欠陥の検出度は劣るが、内部欠陥については漏洩磁束の拡がりが大きく、磁粉の粒度が大きいので検出度は高い、直流においても乾式磁粉を用いた方が深いところにある欠陥の検出度が高い、従ってグラスライニングの問題に焦点を当てて磁粉探傷試験を行うような場合は表面に開口した欠陥よりも、むしろ表面近傍に近い内部欠陥の検出度が問題になり、その意味では交流よりは直線で、湿式よりは乾式磁粉を用いた方法で試験計画を考へる必要がある。

浸透探傷試験における試験条件と欠陥検出度

浸透探傷試験は表面に開口している欠陥でない欠陥指した模様は得られない。従ってその検出度は表面状況によって大きく左右されることになる。すなわち欠陥部に油が付着し、他物質がつまったり、また開口部がさびてスラッグなどがついていたりすると検出できない。従ってその妨害因子を取り去る作業を十分に行う必要がある。欠陥部に浸透した浸透液はとれず、表面についた不要部分は除去し易い、また素地とは高いコントラストを示すものが検出度も高くなる。

浸透液には染色浸透液と蛍光浸透液とがあるが、染色浸透液は指示模様が拡がる傾向にあり、欠陥の実寸法測定に後者の方がすぐれている。

圧力容器において浸透探傷試験を適用していく上では、腐食割れが特に問題とされるオーステナイト系ステンレス鋼及びニッケル基合金については、探傷材料の選定に十分な注意が必要と思われる。ASME 規格の例では探傷材料の成分について試料 100 g を蒸発乾固させ、残留物重量が 0.005 g 以下であることと規定している。但しそれを越える場合には次のことを満足する必要がある。

- 1) 残留物中の総ハロゲン量が 1 % 以下であること。
- 2) 残留物中の硫黄量が 1 % 以下であること。

探傷条件の決定では特に問題になるのが浸透時間の設定であるが、現実にはいかなる浸透時間が最適かということでは、特に溶接部のようにさまざまな大きさの欠陥があり、表面状態も千差万別である。また理論的にも、実験的にも決定することは困難であり、決定できたとしてもかなり多くの制約条件が必要となる。それゆえ JIS Z2343 (1974) でも試験温度が 15 ~ 40 °C においては、5 ~ 20 分、特に幅の広い割れについては、その 2 倍以上を規定しており、幅の大きな規定となっている。

現在、浸透剤の濡れ性が非常に向上し、浸透時間については 10 分もあれば十分と考えられる。幅を見たとしても 10 ~ 12 分程度で十分である。参考までに第 8 表に ASTM 規格に定められている時間例を示しておく。

浸透探傷試験によって表面状況がよく、正しい処理で行うならばミクロン程度の幅と深さを有するものも検出できるが、実際の欠陥として認識するのはむしろ長さ方向の状況によって欠陥と判定するケースが多い。

む す び

各種の非破壊試験方法にはそれぞれの特色があり、一つの方法で完全にすべてを検出し得る方法は存在しない。例えば溶接部の放射線透過試験で全数検査しても割れの検出度が低く、超音波探傷試験によってこれを補っても表面割れの検出は磁気または浸透探傷試験に頼るしかない。従って各方法の短所を他の方法によって補ない総合的に要求を満たすように非破壊検査方法を適用していかなければならない。

〔参考文献〕

- 1) (社) 非破壊検査振興協会：非破壊検査ハンドブック(1982)、(社) 非破壊検査振興協会
- 2) 石井勇五郎：非破壊検査工学(1973)、(株) 産報
- 3) 野原石松：圧力容器(1970)、共立出版株式会社