

ステンレス鋼溶接金属を透過した超音波探傷性能 の確認結果(第2報)

Result of UT Verification Test for Stainless Steel through Weld Deposit (2nd Report)

関西電力株式会社	瀬良 健彦	Takehiko SERA	Member
関西電力株式会社	高田 泰和	Yasukazu TAKADA	
関西電力株式会社	棚橋 晶	Akira TANAHASHI	
三菱重工株式会社	関 伊佐夫	Isao SEKI	

Japanese code for ultrasonic testing in-service inspection, named JEAC 4207, allows inspection through weld metal, in case that some factors, such as weld crown or other structures, disturb scanning. The applicability of through weld metal inspection had been reported with BWR piping. This paper will be technical basis of applicability of through weld metal inspection for PWR piping, which is thicker and has factor hardens inspection. The data successfully shows the capability for detection and sizing by through weld metal inspection.

Keywords: Ultrasonic Testing, Weld Metal, PWR, Piping

1. 緒言

現在停止を続けている原子力発電所が再稼動し た場合、その安全性を維持していくための定期的な 検査の重要性は、より一層増加して行く。

原子炉冷却材系統等の重要な系統の設備については、供用期間中検査(ISI)と呼ばれる定期的な検 査により健全性が確認され、その場合の体積試験手 法は超音波探傷(UT)によるものが中心である。

供用期間中検査は溶接部を中心に実施され、溶接 線の両側の一定の範囲が検査の対象である。溶接金 属は、母材に比べ超音波の減衰が大きいため、探傷 は母材側から行うことを原則としているが、超音波 探傷の関連技術の進歩により、超音波を溶接金属に 通過させても十分な検査精度が期待できるものと なってきたことから、超音波探傷の規程 JEAC4207-2008/2012年追補(軽水型原子力発電所用 機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規 程[1])では、溶接金属越しの探傷を可能としている。

これにより、探触子と周辺構造物の干渉等により、 検査対象部位に超音波が入射できない場合に、溶接 金属越しに超音波を入射し、当該部の健全性を確認 することが可能となる。

このような探傷方法の性能について、期待される 検査精度が沸騰水型軽水炉(BWR)の配管を対象に 報告されているが[2]、本報はそれに続くものとして 口径/板厚比率の異なる加圧水型軽水炉(PWR)の 配管についても、期待される検査精度を確認したも のであり、JEAC4207 に基づく探傷を行った場合に 期待される探傷性能の根拠となるものである。

連絡先: 瀬良 健彦 〒919-2392福井県大飯郡高 浜町田ノ浦1 E-mail:sera.takehiko@b4.kepco.co.jp

2. 確認された技術

2.1 試験体

本研究で用いた試験体は、PWRのISIの対象として代表的な寸法(4B,6B,10B,12B)の溶接継手(管材-管材(Pipe/Pipe)、管材-鋳造材(Pipe/Cast))を製作して、欠陥を付与したものを準備した。欠陥は、放電加工(EDM)、機械的荷重による疲労割れ(Fatigue)、および応力腐食割れ(SCC)を付与した。

製作した試験体の仕様をTable 1 およびFig. 1 に示 す。なお、疲労割れおよび応力腐食割れの欠陥深さ については、破面開放等により、欠陥の性状の適切 性とともに実深さを確認した。

Table 1 Test Specimen				
Type of	Diameter	Crack	Crack	
weld	[Thickness]	insertion	depth[planned]	
		method		
Pipe/Pipe	4B	EDM	Allowable Flaw ^{*1} ,	
	(12.7mm)		10%t, 25%t, 50%t	
	6B	SCC	Allowable Flaw ^{*1} ,	
	(18.2mm) 10P		25%t, 50%t, None	
Pipe/Cast	(28.6mm)	EDM ^{*2}	Allowable Flaw ^{*1} ,	
	12B		10%t, 25%t, 50%t	
	(33.3mm)	Fatigue ^{*2}	Allowable Flaw ^{*1} ,	
			25%t, 50%t, None	

Pipe : SUS304TP、Cast : SCS14A

Crack aspect ratios : 0.15

*1:JSME S NA1-2008 [3] EB-2000

*2: Crack was given to the cast side.



Fig. 1 Test specimen

2.2 探傷方法および探傷機材

探傷方法及びプローブ仕様を Table 2 に、使用した 探傷器を Table 3 にそれぞれ示す。従来 UT は横波、 縦波の両方を、フェーズドアレイ UT はサイジング を考慮して縦波のみにより、溶接金属を透過した探 傷を行う。プローブは配管サイズ・UT 手法ごとに それぞれ専用設計をしており、屈折角は溶接部を透 過する距離が短くなるように大屈折角(60 度・70 度)とした。また、実機での適用性を考慮して配管 サイズごとにプローブサイズを制限した。プローブ の一例を Fig.2 に示す。また、探傷は半自動型の2 軸スキャナを用いて C スキャンデータを採取する。 フェーズドアレイ UT は屈折角を変化させたセク タスキャン(35~70 度の 5 度ピッチ)により探傷を 行い、分析の際は従来 UT(縦波)と同様の屈折角 (60 度または 70 度)を中心として評価を行う。

Inspection	Inspect through depo (weld metal)		
method	Pipe/Pipe	Pipe/Cast	
Conventional	2MHz	1MHz	
(Shear)	70degree	70degree	
Conventional	2MHz	2MHz	
(Longitudinal)	60degree	70degree	
Phased Array	2 or 3 MHz	2 or 3 MHz	
(Longitudinal)	35 – 70 degree	35 – 70 degree	

Table 2-2 Inspection	method	(Probe	spec)
-----------------------------	--------	--------	-------

nal) (Longitudinal)
AD60 3K32X16(8X4ch)LAD
AD70 3K32X16(8X4ch)LAD
AD60 3K32X16(8X4ch)LAD
AD70 3K32X16(8X4ch)LAD
AD60 2K40X20(8X4ch)LAD
AD70 2K40X20(8X4ch)LAD
AD60 2K40X20(8X4ch)LAD
AD70 2K40X20(8X4ch)LAD

Upper:Pipe/Pipe Lower:Pipe/Cast

Table 3 Instrument

	Probe		
Instrument	Conventional	Phased Array	
TomoscanIII-UT	Х	-	
DYNARAY	-	Х	

プローブおよび探傷器の校正は JEAC4207-2008 に従い実施した。従来 UT(縦波)およびフェーズ ドアレイ UT(縦波)の基準感度の校正は JEAC4207 の 4253 項にある縦波斜角法による「基準感度の設 定(溶接線を通過した探傷を実施する場合)」に従 って対比試験体の 1mm 深さのノッチを用いて行っ た。

一方、従来 UT (横波)の基準感度の校正は JEAC4207 中に溶接線を透過した探傷の場合におけ る手順の記載がないため、一般的な横波斜角法で用 いる 4240 項にある横波斜角法による探傷方法に従 って対比試験体の横穴を用いて行った。(試験部の 厚さ T が 25mm 以下の場合 T/2、試験部の厚さが 25mm を超え 51mm 以下の場合 T/4 および 3T/4)



(a) Conventional (Shear)



(b) Conventional (Longitudinal)



(c) Phased array (Longitudinal) Fig. 2 Probe

2.3 検査員の技量

JIS Z 2305(非破壊検査-技術者の資格及び認証 [4])に基づく超音波探傷試験(UT)レベル2以上 の資格を持ち,当該部位の検査経験を十分に有する 検査員がデータ取得を実施した。

2.4 データ取得にあたっての体制

取得されたデータに対する説明性を向上させる ため、(一財)発電設備技術検査協会を第三者機関 とし、その管理の下、Fig. 3 に示すようにデータ取 得、分析および破壊調査を行った。



3. 試験結果

3.1 探傷結果

管材-管材に EDM と SCC を付与した試験体およ び、管材-鋳造材に EDM と Fatigue を付与した試験 体に対して従来 UT (縦波)、(横波)およびフェー ズドアレイ UT (縦波)により溶接金属を透過した 探傷を実施した。

管材-管材 SCC と管材-鋳造材 Fatigue の夫々で、 同一の欠陥に対する各種探傷手法の探傷波形及び 探傷画像データ例を Fig.4 に示す。



(a) Conventional (Shear) (Pipe/Pipe)(SCC)

Fig. 4 Inspection result



(b) Conventional (Longitudinal) (Pipe/Pipe)(SCC)



(c) Phased array (Longitudinal) (Pipe/Pipe)(SCC)



(d) Conventional (Shear) (Pipe/Cast) (Fatigue)

Fig. 4 Inspection result(Contd.)



(e) Conventional (Longitudinal) (Pipe/Cast)(Fatigue)



(f) Phased array (Longitudinal) (Pipe/Cast)(Fatigue) Fig. 4 Inspection result(Contd.)

3.2 検出性

3.2.1 管材-管材

板厚比で表わした欠陥(SCC)深さと検出性の関 係を Fig.5 及び Fig.6 に示す。Fig.5 では、縦軸を欠 陥からのエコー高さレベル(S)とノイズレベル(N)の 比率を示す S/N とし、Fig.6 は、縦軸を欠陥からのエ コー高さについて DAC%でまとめたものである。な お、Fig.5.6とも縦軸0のプロットは、欠陥の検出が 不可であったことを示す。

従来 UT(縦波)を用いた場合、評価不要欠陥寸 法以上の欠陥(検出すべき寸法の欠陥)を概ね S/N=2 以上で、また検出レベルでは DAC20% 以上で検出さ れた。これにより従来UT(縦波)ではS/N及びDAC% による判定とも評価不要欠陥程度の欠陥検出性能 が期待でき、JEAC4207 で規定される試験要領の有 効性が示された。

一方、従来 UT(横波)を用いた場合、S/N による 判定であれば縦波とほぼ同様に評価不要欠陥の欠 陥検出性能は期待できるが、DAC%による判定では 一部の評価不要欠陥寸法以上の欠陥の検出レベル が DAC20%以下であった。

但し、横波についても縦波とほぼ同等の欠陥検出 性能が期待できるため、縦波の補完手法として横波 を適用することも有効である。

なお、フェーズドアレイ UT(縦波)は、従来 UT よりも高い S/N、DAC%を示している。

よって、従来 UT (縦波、横波) で確認された指 示部に対する詳細な評価を行う手法として、フェー ズドアレイの適用が有効である。







(b) Conventional (Longitudinal)







3.2.2 管材-鋳造材

板厚比で表わした欠陥深さと検出性(S/N)の関係 を Fig.7,8 に示す。Fig.7 では EDM を、Fig.8 では Fatigue の検出性を示す。なお、Fig.7,8 とも縦軸0の プロットは、欠陥の検出が不可であったことを示す。

一般に鋳造材は、管材に比べ超音波の透過性が悪いため、3.2.1項に示す管材における信号レベル(S/N) と比較して若干低下する傾向が得られた。

従来 UT (縦波) を用いた場合、評価不要欠陥寸 法以上の欠陥(検出すべき寸法の欠陥)を概ね S/N=2 以上で検出可能であった。これにより従来 UT(縦 波)を用いた場合、S/N による判定にて評価不要欠 陥程度の欠陥検出性能が期待でき、JEAC4207 で規 定される試験要領の有効性が示された。





(b) Conventional (Longitudinal)









3.3 深さサイジング 3.3.1 管材-管材

深さサイジングの精度確認については、NDIS0603 (超音波探傷試験システムの性能実証における技 術者の資格及び認証[5])に基づく認証(所謂 PD 制 度による認証)が必要であり、その認証には深さサ イジングの RMS 誤差が 3.2mm 以内であることが規 定されている。ここでは、PD 認証において要求さ れる RMS 誤差 3.2 mmを判断基準として、深さサイジ ング特性を評価し、溶接金属を透過した探傷の場合 における欠陥深さサイジングの PD 認証の可能性に ついて確認した。

フェーズドアレイ(縦波)による深さサイジング が最も良い結果であり、その結果を Fig.9 に示す。 Fig.9 における縦軸 0 のプロットは、欠陥の深さサイ ジングが不可であったことを示す。

RMS 誤差は 3.5mm と PD 認証の可能性があり、溶接 金属越しの深さサイジングの可能性を示した。



3.3.2 管材-鋳造材

管材-管材と同様にフェーズドアレイ(縦波)が 最も良い結果であり、その結果を Fig.10 に示す。 Fig.10 における縦軸 0 のプロットは、欠陥の深さサ イジングが不可であったことを示す。

RMS 誤差は 2.3mm と管材-管材よりも良い結果 であり、フェーズドアレイによる深さサイジングの 可能性を示した。



3.4 長さサイジング 3.4.1 管材-管材

長さサイジング手法としては 6dB ダウン法、消失 長さ法、DAC20% しきい値法により行ったが、全体 的に過小評価傾向であり、消失長さ法が最も高い精 度を示した。また、JEAC4207 に記載されている DAC20% しきい値法ではノイズレベルが DAC20% 程度となる場合が多く、消失長さ法とほぼ同等の値 を示した。消失長さ法による管材-管材(SCC)の 長さサイジング結果を Fig.11 に示す。

従来 UT (横波) が最も高い精度を示し、RMS 誤 差は 5.7mm であった。













3.4.2 管材-鋳造材

管材-管材と同様に複数の手法により長さサイ ジングを行ったが、全体的に過小評価傾向であり、 消失長さ法が最も高い精度を示した。消失長さ法に よる管材-鋳造材(Fatigue)の長さサイジング結果 を Fig.12 に示す。

従来 UT (横波) が最も高い精度を示し、RMS 誤 差は 7.8mm であった



	Pipe/Pipe		Pipe/Cast	
	EDM	SCC	EDM	Fatigue
Conventional (Shear)	3.4	4.2	3.4	2.6
Conventional (Longitudinal)	1.3	4.0	2.1	3.4
Phased Array (Longitudinal)	1.2	3.5	1.1	2.3

Table 3 Depth Sizing RMSE(mm)

Table 4 Length Sizing RMSE(mm)

	Pipe/Pipe		Pipe/Cast	
	EDM	SCC	EDM	Fatigue
Conventional (Shear)	7.3	5.7	10.2	7.8
Conventional (Longitudinal)	5.9	13.0	8.0	10.1
Phased Array (Longitudinal)	8.3	10.1	6.6	9.9

4. 考察

確認された PWR 配管における溶接金属を透過し た探傷における欠陥の検出性については、既報告の BWR 研究の成果[2]と同様に、S/N,DAC%による評価 とも縦波が有効である。PWR の方がより肉厚の設計 となっており、溶接金属内で減衰の少ない縦波を適 用するメリットは大きい。一方で、従来 UT(横波) であっても、溶接部を透過する距離(航路)が短く なるような大屈折角(70度)を適用することにより、 従来 UT(縦波)とほぼ同等の欠陥検出性能が確認 でき、縦波の補完手法としての有効性を確認できた。 この航路を短くした効果が大きかったことは、管材 よりも超音波の透過性が悪い鋳造材における長さ サイジングの精度が良かったことからも確認され る。

一方、従来 UT(縦波、横波)で確認された指示 部に対する詳細な評価を行う手法として、フェーズ ドアレイ適用の有効性が示された。 深さサイジングと長さサイジングの各手法の RMS 誤差を Table 3 および4にそれぞれ示す。深さ サイジングに関してはフェーズドアレイ(縦波)が 全ての条件において最も良い結果を示した。これは、 フェーズドアレイのメリットである超音波ビーム の集束により、溶接金属での減衰を経ても有効なエ コー高さが得られるような超音波ビーム強度が確 保されたことによるものと考えられる。すなわち、 深さサイジングにおいてはその適用を優先すべき 手法であると考えられる。

5. 結言

本稿の報告により、管材-管材/鋳造材の何れも 従来 UT(縦波)にて、評価不要欠陥寸法以上の欠 陥検出が可能であり、JEAC4207 で規定される試験 要領の有効性が示された。

今後、本論文が JEAC4207 で規定されるステンレ ス鋼溶接金属越し検査の技術根拠となり、ISI がよ り充実し、原子力発電所設備の安全性が向上するこ とを期待する。

参考文献

- [1] 日本電気協会 軽水型原子力発電所用機器の供 用期間中検査における超音波探傷試験規程 JEAC4207-2008,JEAC4207-2008[2012 年追補版]
- [2] 永田義昭,長谷川勝広,久米田正邦,他: "ステン レス鋼溶接金属を透過した UT(検出)確認試験 研究の成果",保全学, Vol.9, No.3, pp.1-6 (2010)
- [3] 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2008 年版) JSME S NA1-2008
- [4] 日本規格協会 非破壊検査-技術者の資格及び 認証 JIS Z 2305:2001
- [5] 日本非破壊検査協会 超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証 NDIS 0603:2013 附属書 A

(平成 27 年 1 月 22 日)