

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

Result of UT verification test for Stainless Steel through weld deposit

中国電力株式会社	永田 義昭	Yoshiaki NAGATA
東北電力株式会社	長谷川勝広	Katsuhiro HASEGAWA
東京電力株式会社	久米田正邦	Masakuni KUMEDA
中部電力株式会社	稲垣 哲彦	Tetsuhiko INAGAKI
北陸電力株式会社	中田 親秀	Chikahide NAKADA
日本原子力発電株式会社	太田 隆	Takashi OHTA
電源開発株式会社	田口 豊	Yutaka TAGUCHI
日立GEニュークリア・エナジー株式会社	米谷 豊	Yutaka KOMETANI
日立GEニュークリア・エナジー株式会社	清水 康	Yasushi SHIMIZU
株式会社 東芝	三橋 忠浩	Tadahiro MITSUHASHI
株式会社 I H I	東海林 一	Hajime SHOHJI
財団法人 発電設備技術検査協会	山口 篤憲	Atsunori YAMAGUCHI Member
財団法人 発電設備技術検査協会	杉林 卓也	Takuya SUGIBAYASHI
財団法人 発電設備技術検査協会	小林 輝男	Teruo KOBAYASHI

BWR owners and plant fabricators have been making efforts to decrease the ISI parts where UT is difficult to be conducted. For that purpose, UT verification test for both detection and sizing qualification through deposit of pipe weld joint started in 2009 and will last until 2011.

In 2009, UT verification test for stainless steel pipe weld joint has been performed. Test samples are stainless steel pipes with welds and sizes are 600A.350A.150A with EDM notches and/or SCCs. Angle beam methods and phased-array angle beam methods have been applied.

The detection test shows that there are no failure to detect and no false call. The length sizing test shows that RSM errors of SCC lengths are within the ASME acceptance criteria. So, it is clarified that each method has the enough qualification for UT through deposit of stainless steel pipe weld joint.

These tests have been witnessed and evaluated by JAPEIC as the third body.

Keywords: Ultrasonic Testing, Stainless steel, Stress Corrosion Cracking, Phased array UT

1. 緒言

原子力発電設備の供用期間中検査(ISI: In-Service Inspection)で要求される体積試験(超音波探傷試験(UT; Ultrasonic Testing))において、構造上接近又は検査が困難な部位は、探傷不可範囲として取り扱ってきた。^[1]

近年、加圧水型軽水炉(PWR; Pressurized Water Reactor)の蒸気発生器一次冷却材入口管台溶接部に確認されたき裂が、ISIにおける探傷不可範囲であったことから、ISIにおけるUTでの探傷不可範囲の低減が求められている。^[2]

また、沸騰水型軽水炉(BWR; Boiling Water Reactor)発電設備の定期事業者検査でのUT対象配管にも、エ

ルボや管台等の形状的な条件から、必要な探傷ができない探傷不可範囲が存在する。

探傷不可範囲の低減策として、炭素鋼の溶接継手の場合、超音波探傷が可能な片側から溶接金属を透過しての探傷による対応が考えられるが、ステンレス鋼溶接の場合、一般的に用いられている横波斜角法では溶接部の柱状晶組織による音響異方性のため超音波の透過性に難があることが知られている。^[3]

(独)原子力安全基盤機構(JNES)のUTSプロジェクト実証試験^[4]では、ステンレス鋼の溶接金属を透過する超音波は、縦波斜角が有効であることが示されており、これを反映してJEAC4207-2008「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」では、溶接線を透過した探傷を行う範囲は超音波モードとして縦波が望ましいとしている。しかし、当該箇所の探傷に縦波斜角法を適用するためには、JEAC4207-2008の2010項に規定されているように「欠陥評価を行う上で、予め欠陥検出精度及び欠陥寸法測定誤差の確認」が必要であることから、BWRの電力各

連絡先:小林 輝男
(財)発電設備技術検査協会
溶接・非破壊検査技術センター
〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町 14-1
E-mail:kobayashi-teruo@japeic.or.jp

社とプラントメーカーは共同研究で「ステンレス鋼溶接金属を透過した UT 確認試験研究」を 2009 年度から 2011 年度にかけて実施している。

本稿では 2009 年度に実施したオーステナイト系ステンレス鋼同士の突合せ継手の溶接金属を透過した UT での検出に関する試験結果を報告する。

2. 研究背景及び目的

PWRプラントでき裂が確認された部位は、構造上接近又は検査が困難であるとして、電気事業法（昭和39年法律第170号）第55条第1項に規定する、定期事業者検査として要求される体積試験（UT）が行われていない範囲であった。このことから原子力安全・保安院（NISA）から、同様の理由によりUTが行われていない箇所について、「定期事業者検査における超音波探傷試験の代替措置計画策定について(指示)」（平成20・02・05 原院第5号）が発行され、電気事業者に対して、探傷不可範囲への対応が求められた。

探傷不可範囲がある継手のイメージをFig.1に示す。

形状的に超音波探触子の走査が行えない部分がある部位については、探触子のサイズや入射角の変更で探傷条件を満足できるケースもあるが、一部には超音波が溶接金属を透過する方式で、健全性の評価が必要となる継手も存在している。(fig.2参照)

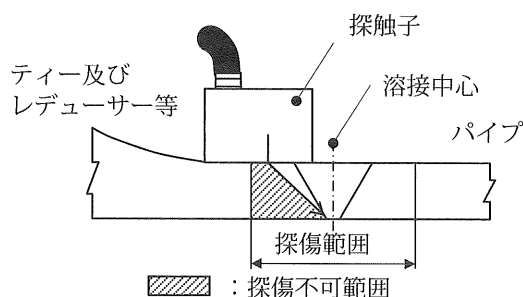


Fig.1 探傷不可能範囲がある継手の例

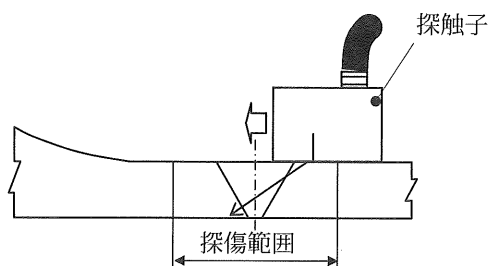


Fig.2 溶接金属を透過しての探傷例

本研究は、探傷不可範囲の低減に有効と考えられる溶接金属を透過した探傷の有効性の検証を目的として実施した。

3. 探傷試験

3.1 体制

探傷試験は、試験および試験結果の信頼性確保を図るため第三者機関である（財）発電設備技術検査協会（発電技検）構内において、同協会の管理の下、下記のメーカー（技術協力会社含む）が試験を実施した。

メーカー：日立GEニュークリア・エナジー株式会社
株式会社東芝

メーカーの技術協力会社：株式会社日立製作所
株式会社 I H I

3.2 試験体

探傷不可範囲の代替措置として溶接金属を透過した超音波探傷が必要となる代表箇所として、BWRの原子炉再循環系の配管の溶接継手部がある。このため、試験対象は当該箇所と同等な材質で代表的な口径の突合せ継手とし、基礎試験用には EDM ノッチの試験体、実証試験用には実機における損傷モードを想定して、SCC (Stress Corrosion Cracking = 応力腐食割れ) を付与した試験体にて試験を実施することとした。

試験体材質：オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316
口径(板厚)：600A(35mm), 350A(25mm), 150A(10mm)

試験体形状：幅 100mm×長さ 400mm 短冊状

(1) 基礎試験用

基礎試験用の EDM ノッチ試験体は Table-1 に示すように、軸方向位置として溶接中心からの距離をパラメータとした、3種類の深さの試験体を発電技検が所有する試験体から選定して使用した。

Table-1 基礎試験用 EDM ノッチ試験体一覧表

		溶接中心からの距離		
		4mm	7mm	14mm
深さ	3mm	—	—	600A
	5mm	600A, 350A 150A	600A, 350A 150A	600A
	10mm	—	—	600A

(2) 実証試験用

実証試験用の SCC 試験体は、基礎試験用の試験体と同様に、軸方向位置及び深さがパラメータとなる試験体を、発電技検が所有する試験体から選定した。さらに、検出性試験のための無欠陥の試験体も使用した。

試験体選定の目標値としての溶接中心からの距離及び深さの組合せを Table-2 に示す。又、試験体(例)の写真を Fig.3 に示す。

Table-2 実証試験用 SCC 試験体一覧表(目標値)

		溶接中心からの距離		
		4mm	7mm	14mm
深さ	3mm	—	150A	—
	5mm	600A, 150A 350A×2	600A 350A×2	150A※ 350A
	10mm	—	600A, 350A	600A, 350A
	15mm	—	—	600A

※；SCC 付与が困難なため、疲労割れを採用

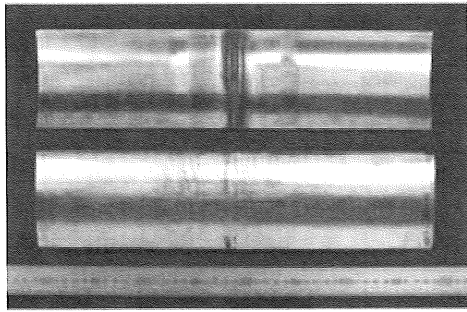


Fig.3 試験体(例)の写真

3.3 試験準備

試験は、メーカーがそれぞれ独自に探傷装置の選定と探傷方法を定め、発電技検(NDEセンター)内の試験場において基礎試験(オープン試験)および実証試験(ブラインド試験)を実施した。

EDMノッチの試験体を除く全ての試験体は内表面及び側面と、き裂が付与されている側をマスキングし、超音波探傷試験以外では試験体に関する情報が得られない状態で試験を実施した。試験体のマスキング状況をFig.4に示す。

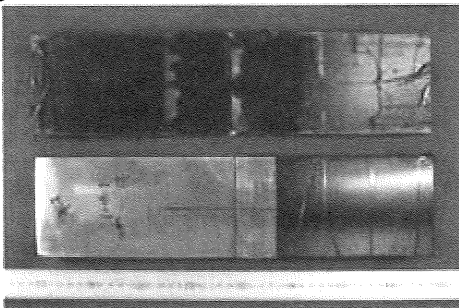


Fig.4 試験体マスキング状況写真

尚、EDMノッチの試験体を除く試験体は、試験体数28体(試験データ数;31データ※)で実施した。

※;28体の内、3体の無欠陥試験体について、溶接線の両側から探傷することでデータ数を31とした。

3.4 検査員技量確認

試験に参加した検査員全員の、ISIでのUT、SUS材へのUT及びフェーズドアレイ法(PA)等の、超音波探傷試験経験年数をFig.5に示す。

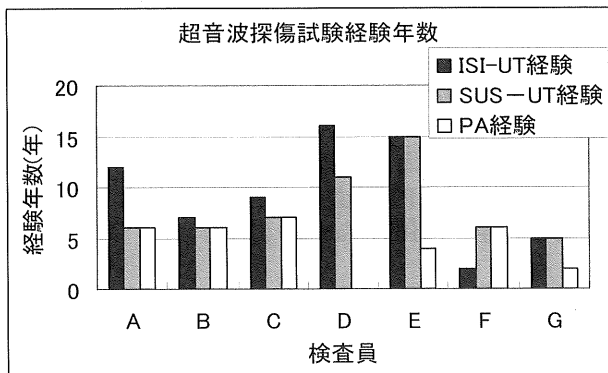


Fig.5 超音波探傷試験経験年数

また、検査員全員に対し、15箇所(き裂有5箇所、無欠陥10箇所)のブラインド試験を行い、き裂付与側からのき裂検出及びき裂長さサイジングに関する技量の確認を行なった。

その結果、全員が5箇所のき裂を検出し、10箇所の無欠陥を正確に評価した。また、長さサイジングのRMSE(2乗平均平方根誤差)は4.0~8.7mmの結果が得られている。検査員全員のUTによる指示長さと内面PTによる指示長さの差異をFig.6に示す。

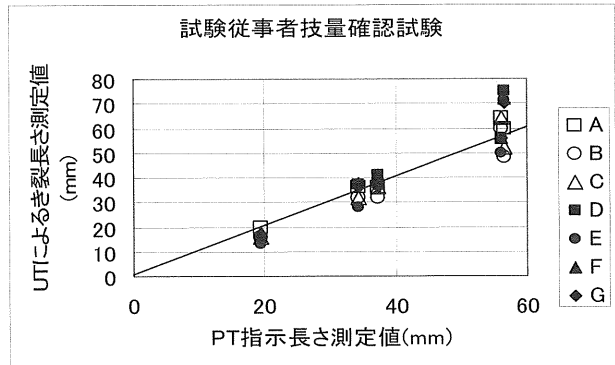


Fig.6 UT指示長さとPT指示長さの比較

3.5 探傷方法及び探傷装置

実機において溶接金属を透過した探傷を行う場合、形状やスペースの条件で、適用できる手法が限定されることを想定し、45°及び60°固定角斜角法と、PA斜角法の3手法の検出性を評価した。

超音波の種類は溶接金属に対して透過性の優れた縦波を選択し、周波数は2MHz~4MHzを採用した。

4. 試験結果

4.1 基礎試験 (EDM ノッチ)

EDM ノッチ試験体の、検出及び指示長さ測定を、PA縦波斜角法(一部横波斜角法も適用)、縦波45°斜角法及び縦波60°斜角法で実施した。これらの手法による探傷で得られた指示長さと、EDM ノッチの実測値との差異分布をFig.7に示す。また、これらの手法のRMSE及び誤差平均をTable-2に示す。

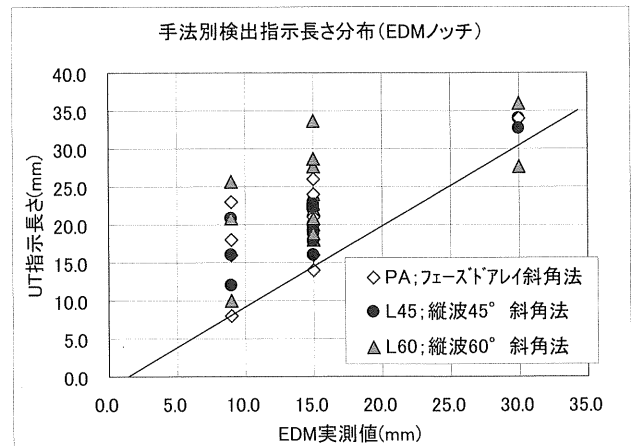


Fig.7 手法別検出指示長さ分布 (EDM ノッチ)

Table-3 手法別検出指示長さデータ (EDM ノッチ)

探傷方法	データ数	RMSE	誤差平均
PA 斜角法	18	6.4	4.8
縦波 45° 斜角法	16	5.6	4.9
縦波 60° 斜角法	15	8.3	7.4

Fig.7 及び Table-3 から、各手法共指示長さは実測値と比較して長い値を示しており、保守的な結果が得られている。縦波 60° 斜角法は、他の手法と比べて指示長さが長い傾向にあるが、RMSE の値は 8.3mm であり、有効な手法の一つと言える。

4.2 実証試験 (ブラインド試験)

メーカー2 社によって、PA 斜角法、固定角斜角法で、SCC(一部疲労き裂を含む)を付与した試験体と、無欠陥の試験体で構成した試験体の、き裂検出及びき裂長さ測定を、ブラインド方式で実施した。尚、メーカー2 社はそれぞれパーティションで仕切り、相互を隔離した状態でTV カメラによる常時監視のもとで試験を行なった。

4.2.1 適用手法

ステンレス鋼溶接部の溶接線を透過してのき裂検出を目的としていることから、以下に示す斜角法が主に採用されている。

Table-4 実証試験適用手法

探傷手法		A 社	B 社	備考
PA	縦波	○	○	
	横波		○	150A に適用※
固定角 45°	縦波	○	○	
固定角 60°	縦波	○	○	
	横波		○	150A に適用※

※;150A 配管の場合、溶接金属を透過する距離が短いことから横波を採用

4.2.2 検出性 (=欠陥識別性)

SCC(一部疲労き裂を含む)を付与した試験体と、無欠陥の試験体を順不同で探傷した結果、2 社共適用した全ての手法で、誤検出 (=き裂を見逃す、或は無欠陥をき裂有りと判定する誤判定) が無い結果であった。

また、母材部に付与した長さ 1mm の EDM ノッチを CRT の 80% となるように基準感度を設定して探傷した結果、全て基準感度の 20% 以上で検出されており、十分な検出能力を有することが確認された。

検出性の判定を数値化することは困難であるが、き裂からのエコーの識別性 (=ノイズとの分離性) を、Table-5 に示すように 4 段階に分けそれぞれの得点を設定して評価した。

この評価による、き裂を検出した際のき裂深さと検出性の関係を Fig.8 に、また、き裂の面積(半楕円と想定)と検出性の関係を Fig.9 に示す。

Table-5 検出難易度換算得点

探傷状況	得点
エコー識別明瞭、単独手法で欠陥有無の判断が可能	1.0
エコー識別やや良、単独手法で欠陥有無の判断が可能	0.9
エコー識別不良、他手法と組み合わせで判断が可能	0.5
エコー識別不良、他手法と組み合わせても判断が不可能	0.0

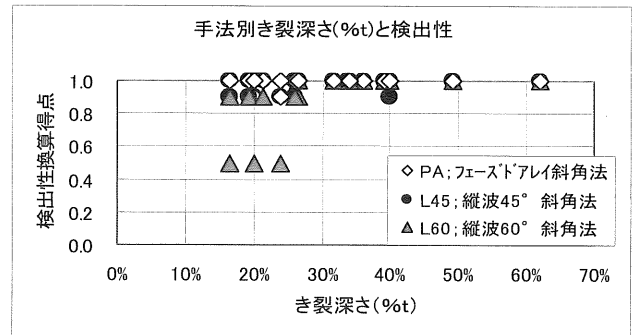


Fig.8 手法別き裂深さと検出性

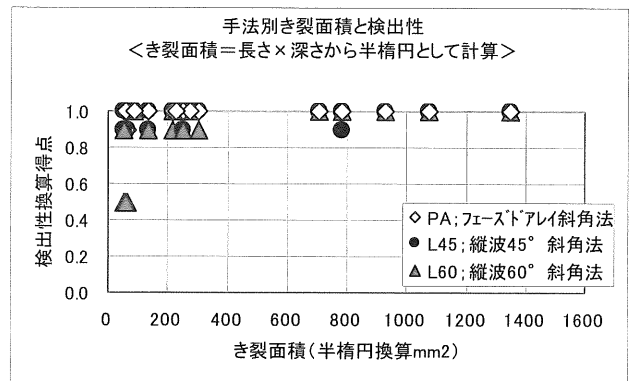


Fig.9 手法別き裂面積と検出性

PA 斜角法及び縦波 45° 斜角法では、実施した全ての試験体のき裂に対して、き裂のエコーが明瞭あるいはやや良の結果が得られ、溶接金属を透過した探傷の有効性を確認できた。しかし、縦波 60° 斜角法では、比較的浅く長さが短いき裂(き裂面積が狭い)の場合、エコーの識別性が低下する結果であった。この結果から縦波 60° 斜角法の実適用に際しては、単独での適用は避けるのが望ましいと考えられる。

なお、き裂検出性と試験体の板厚には相関関係は無いが、本研究ではき裂深さを絶対値ではなく板厚比 (=き裂深さ/板厚×100%) として表現した。

4.2.3 き裂長さサイジング

検出された指示の消失点 (ノイズとの分離限界点) を元に測定した結果をき裂の長さとし、内面 PT によるき裂長さ測定値との比較を Fig.10 に示す。また、各手法毎の測定値を PT による測定値を真値とした RMS 誤差及び誤差平均値を Table-6 に示す。

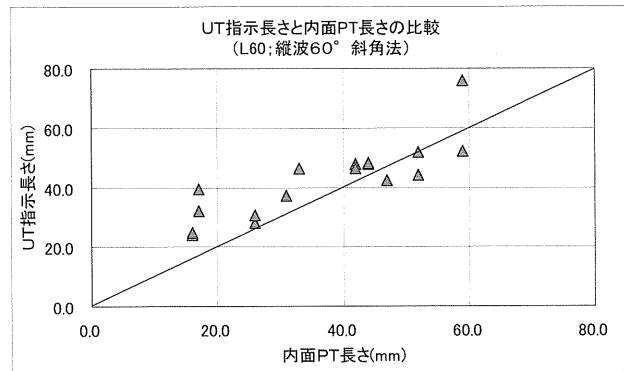
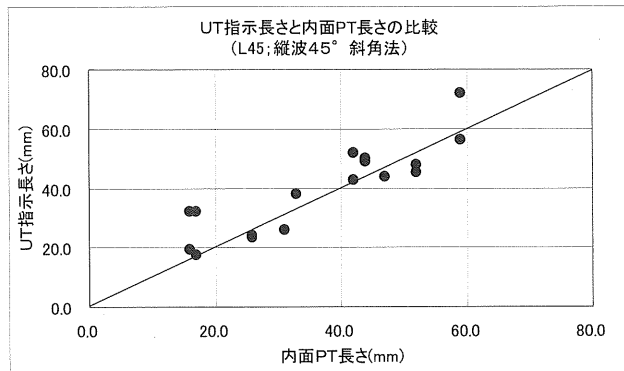
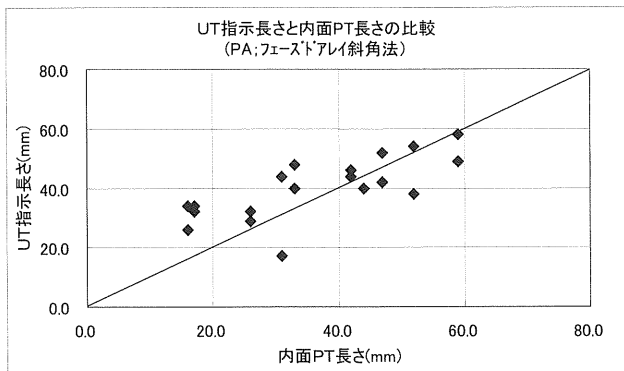


Fig.10 UT 指示長さ と PT 長さ の比較

Table-6 手法別長さサイジング RMSE 及び誤差

探傷方法	RMSE	誤差 平均	誤差	
			Max	Min
PA 斜角法	10.1	3.3	18.0	-14.0
縦波 45° 斜角法	7.5	2.9	16.0	-6.6
縦波 60° 斜角法	9.8	5.7	22.5	-7.8

UT 指示長さのグラフ及び手法別の長さサイジングの RMSE, 誤差平均のデータから, 実機での適用が想定される全ての手法で良好な結果を得ている。

誤差に関しては超音波探傷の特徴である音波の広がりの影響で, +側にずれる傾向を示している。誤差平均においては全ての手法共保守的な結果であり, RMSE に関しては米国 ASME 規格^{*}の PD 合格基準値 (19mm) を満足した結果である。

^{*} ; ASME Code Sec. X1, App. VIII Supplement 2

(オーステナイト系ステンレス鋼配管継手溶接部に関する PDI 認証要件)・・・長さサイジングの RMSE は欠陥の真の値に対して 0.75in(19mm)以下であること。

4.2.4 長さサイジング

本研究は, 探傷不可範囲の低減を目的として, 溶接金属を透過した探傷でのき裂の検出を主体に実施した。ただし, き裂が検出された際にはその長さ測定が必要となることから, 本研究では検出に適用した手法での, き裂長さ測定の可能性を調査した。

溶接金属を透過しての長さ測定値と母材側からの長さ測定値との比較を Fig.12 に示す。なお, き裂長さサイジング精度と板厚には明確な関係は無いが, 本研究においては, 3種類の板厚の試験体による3手法での長さサイジングであることから, 便宜上き裂の長さは板厚の比 (=き裂長さ/板厚×100%) を用いて表現した。

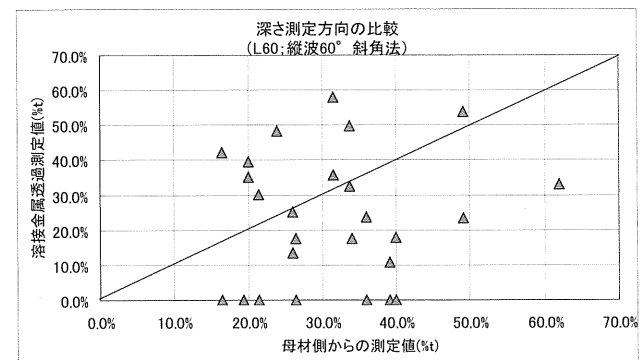
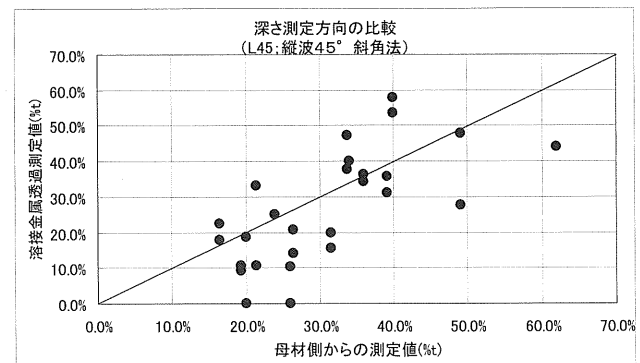
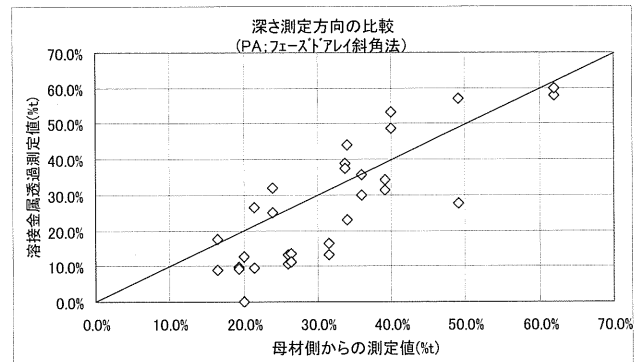


Fig.12 長さ測定方向の比較

また、手法毎の RMSE 及び深さ測定不能箇所数を Table-7 に示す。

Table-7 手法別 RMSE 等のデータ

	PA	L45°	L60°
RMSE	3.0	3.2	3.7
深さ測定不能箇所数	1	2	7

Fig-12 及び Table-7 に示す内容から、今回のき裂の検出を目的とした装置による深さ測定の適用性確認においては、多少のばらつきはあるものの全体的に良好な結果が得られたと考えられる。また、深さ測定に特化した探触子の適用などにより、更なる精度向上の可能性はあるが、大まかなき裂深さの推定は、支障なく行えることが確認された。

5. 結言

ステンレス鋼溶接金属を透過した超音波探傷によるき裂の検出には、縦波斜角法を用いることで所期の目的を達成できることを確認した。また、溶接金属を透過してのき裂深さ測定の可能性を確認できた。

参考文献

- [1]「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((社)日本電気協会原子力規格委員会)解説-2620-1
- [2]「定期事業者検査における超音波探傷試験の代替措置計画策定について」平成20・02・05 原院第5号
- [3] 米山弘志「オーステナイト系溶接部の超音波探傷」溶接技術 1994年10月号
- [4] (独)原子力安全基盤機構「平成16年度原子力発電設備検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度に関するもの)」[総括版]平成17年4月