

# セーフエンド溶接部に対する UT サイジング手法の高度化

## Development of Advanced Defect Sizing Technique Using Ultrasonic Testing for Nozzle Welding

三菱重工業株式会社	西田 純一郎	Jun-ichiro NISHIDA	Non Member
三菱重工業株式会社	川浪 精一	Seiichi KAWANAMI	Non Member
三菱重工業株式会社	黒川 政秋	Masaaki KUROKAWA	Non Member
三菱重工業株式会社	井手尾 光司	Mitsushi IDEO	Non Member
三菱重工業株式会社	松浦 貴之	Takayuki MATSUURA	Non Member
関西電力株式会社	平野 伸郎	Shinro HIRANO	Non Member
関西電力株式会社	瀬良 健彦	Takehiko SERA	Non Member

In Japan, the preventive maintenance task of the 600 series nickel basis alloy weld of the reactor vessel (RV) and the steam generator (S/G) safe end weld are pushed forward sequentially, and a defect sizing using the ultrasonic testing (UT) from the inside of the safe end is carried out when the defect was detected by surface inspection prior to the work. Some defects are recognized on the S/G safe end and the R/V safe end in Japan, and these defects have occurred in the axial direction of the safe end weld. Therefore the defect sizing by UT arranges a probe on the direct top of the welding and inspects it, and the attenuation of the ultrasonic wave by the welding and influence of being scattered are big, so advanced defect sizing technique for these area is required.

This report shows the development status that aimed at the advancement of the sizing technique from the inside for the safe end weld. We have developed the advanced technique using phased array UT and planned improvement of the sizing accuracy. The UT simulation technology also applied to probe development, and the optimization of the design parameter has been performed. We will apply the developed technology and carry forward safe end maintenance work in future.

**Keywords:** Ultrasonic Testing, Dissimilar Metal Welding, UT Sizing, Phased Array, Matrix Phased Array

### 1. 緒言

600 系ニッケル基合金溶接部の予防保全対策として日本国内では 2007 年より原子炉容器および蒸気発生器のセーフエンド溶接部の検査を実施している。検査は ECT により欠陥検出を行い、検出された指示に対しては UT により欠陥端部エコーを検出してサイジングを行っている。これまでに蒸気発生器セーフエンドでは多数のプラントで欠陥が見つかっており (Fig.1)、原子炉容器セーフエンドでも欠陥が見つまっている。蒸気発生器セーフエンドに対する欠陥サイジングは国プロ NNW と同等の精度を実現しているが、原子炉容器セーフエンドでは欠陥形状が一般的な SCC とは異なった深くて細長く、かつ先端の長さが短い形状であったため (Fig. 2)、端部エコーが検出できずサイジングが出来なかったことが課題となっている。

そこで更なるサイジング精度向上と深くて細長く、かつ先端の長さが短い形状の欠陥もサイジング可能な技術の開発が求められている。

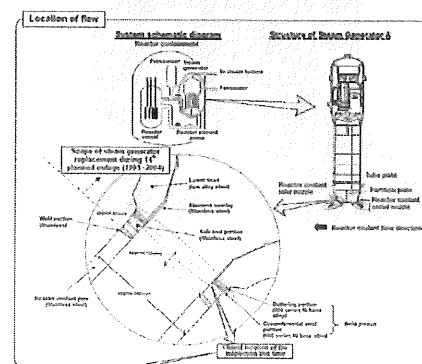


Fig.1 Location of Flaw (Nozzle Welding of Steam Generator)



Fig.2 Actual defect profile of Reactor Vessel

連絡先:西田純一郎、〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1、三菱重工業株式会社神戸造船所品質保証部原子力サービス品質管理課、電話: 078-672-3133、e-mail:junichiro\_nishida@mhi.co.jp

本報告ではセーフエンド溶接部に対する内面からのサイジング手法の高度化を目指した開発事例を示す。欠陥はセーフエンド溶接部の軸方向に発生しているため、UTによる欠陥サイジングは溶接の直上にプローブを配置して検査している。このため、溶接による超音波の減衰や散乱の影響が大きく難しいため、高度化手法としてフェーズドアレイ UT を使った手法を開発し、サイジング精度の向上を図っている。プローブ開発には UT シミュレーション技術も適用し、設計パラメータの最適化も行っている。なお、開発には以下の目標を設定した。

- ・ 蒸気発生器セーフエンドで検出されたような一般 SCC についてはサイジング精度の更なる向上を目指す。
- ・ 原子炉容器セーフエンドで検出されたような深くて細長く、かつ先端の長さが短い SCC については端部エコーの検出性向上によりサイジングの実現を目指す。

## 2. フェーズドアレイ UT 探触子の開発

セーフエンド溶接部のサイジング精度向上や端部エコーの検出性向上を目的に探触子の開発を行った。欠陥は軸方向欠陥であるため、探触子は溶接直上を走査することになり、溶接による超音波の散乱や減衰の影響を受ける。そこで超音波ビームのフォーカシングやスキャンニングが可能なフェーズドアレイ UT 技術をベースに探触子の設計を行った。また、原子炉容器に対して適用した接触法の現行 UT では欠陥端部エコーが検出できなかったが、当該部位は平滑面であり做い性も悪くないのでフェーズドアレイ UT でも現行 UT と同様に接触法で高度化を進めることとした。探触子を設計するにあたり、サイジングすべき領域が深いため深さに応じて 2 種類の探触子を開発した。

浅い領域に対しては表面近傍の欠陥サイジングを実現するため小型の左右分割型 (TRL) フェーズドアレイ探触子とした (Fig. 3-1)。また深い領域に対しては探触子を大型化して深い位置でのビーム集束性を向上させ、さらにマトリックスアレイ化で 3 次元ビームスキャンにより溶接部の超音波曲りの影響を補正できるような構造とした (Fig. 3-2)。マトリックスアレイは点集束ビームとなるため、原子炉容器セーフエンドで検出されたような欠陥先端部が細い欠陥のサイジングに

も有効と考えられる。また、浅い欠陥では超音波の曲がりの影響も小さく、比較的ビーム集束性も優れている小型 TRL フェーズドアレイで対応可能である。開発した探触子の仕様を Table1 に示す。また探触子の外観写真を Fig. 4-1 と Fig. 4-2 に示す。

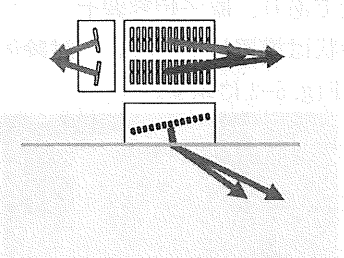


Fig.3-1 Small TRL PA

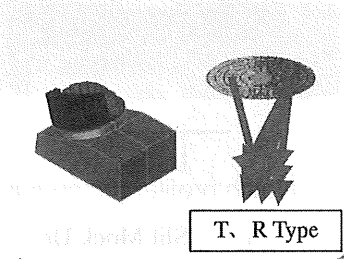


Fig.3-2 TRL Matrix PA

Table1 Probe Specification

	For Shallow Defect (~10mm)	For Deep Defect (10~40mm)
Type	TRL PA	TRL Matrix PA
Frequency	5MHz	2MHz
Piezo Size	10×10 (T, R)	φ43 (T, R)
No. of Elements	20ch × 2	64ch×2

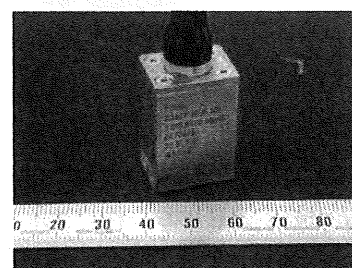


Fig.4-1 Probe view of Small TRL PA

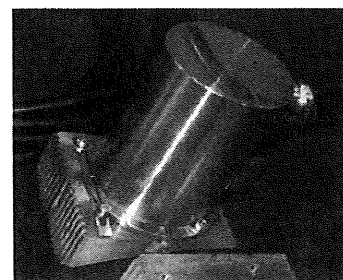
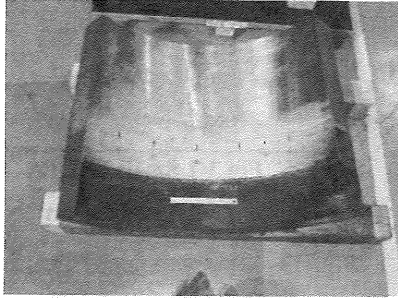


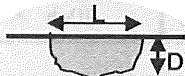
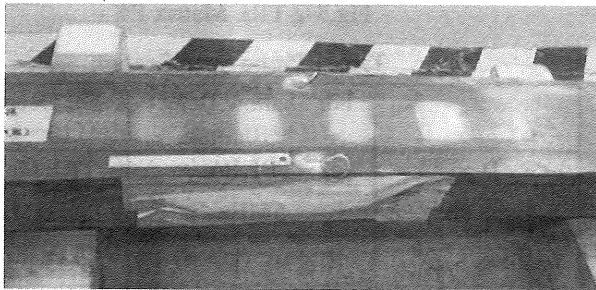
Fig.4-2 Probe view of TRL Matrix PA

### 3. 検証試験結果

開発した探触子を用いて欠陥が挿入された試験体の探傷試験を行った。試験体はスリット試験体と SCC 試験体を準備した。なお、欠陥形状について、今回は一般的な形状であり、原子炉容器セーフエンドで検出された欠陥形状は模擬していない。試験体の外観写真を Fig. 5-1 と Fig. 5-2 に示す。



Notch profile: rectangular  
Fig.5-1 Slit Mock Up



SCC profile:  $D/L < 1$   
Fig. 5-2 SCC Test Piece

探傷はエンコーダを使って位置情報も併せて採取した。また前述したように浅い欠陥には小型 TRL フェーズドアレイ探触子を適用し、深い欠陥には TRL マトリックスアレイ探触子を適用した。浅い欠陥に対する探傷結果を Fig. 6-1 に示す。また、深いスリットに対する探傷結果を Fig. 6-2 に、深い SCC に対する探傷結果を Fig. 6-3 に示す。

5mm 深さのスリットでは縦波前後 2 分割法である現行 UT で若干過大評価傾向であるが、小型 TRL フェーズドアレイ UT はサイジング精度  $\pm 1\text{mm}$  以内であった。3mm 程度の浅い SCC に対しては現行 UT と小型 TRL フェーズドアレイ UT でサイジング精度にあまり差はなかった

が、端部エコーの検出しやすさでは小型 TRL フェーズドアレイ UT の方が溶接部ノイズのレベルが低く、端部エコーの S/N 比で現行 UT より 2 倍近く高い結果となった。深いスリットに対して 20mm 程度までは現行 UT でもサイジング精度はよいが、40mm 近い深さでは現行 UT ではサイジング困難であった。しかし、TRL マトリックスアレイ UT により  $\pm 1\text{mm}$  のサイジング精度であった。深さ 20mm の深い SCC に対して現行 UT のサイジング精度は  $\pm 5\text{mm}$  程度であったが TRL マトリックスアレイ UT では  $\pm 1\text{mm}$  のサイジング精度であった。スリット、SCC とも TRL マトリックスアレイは端部エコーの信号レベルと分解能が優れているためサイジング精度向上の要因になっているが、これは原子炉容器で検出されたような深くて細長く、かつ先端の長さが短い欠陥に対しても有効であると思われる。

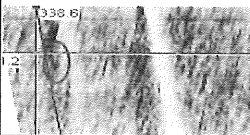
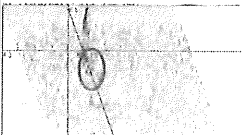
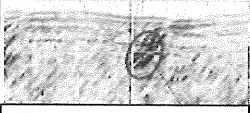
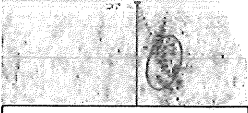
	Conventional UT	Small TRL PA-UT
Slit defect 5mm depth	 Evaluation: 6.5mm	 Evaluation: 4.3mm
SCC defect 2.6mm depth (nominal depth)	 Evaluation: 2.8mm S/N ratio: 3.6	 Evaluation: 2.7mm S/N ratio: 6.8

Fig.6-1 Test result for shallow slit and SCC





	Conventional UT	TRL Matrix PA-UT
Slit defect 23mm depth	 Evaluation: 21.8mm	 Evaluation: 23.0mm
Slit defect 38mm depth	 Evaluation: 19.5mm	 Evaluation: 37.4mm

Fig.6-2 Test result for deep slit

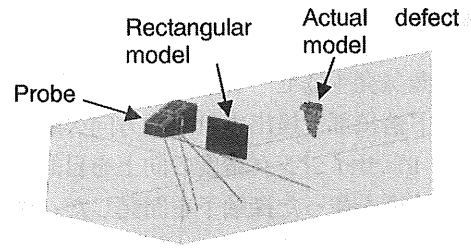
	Conventional UT	TRL Matrix PA-UT
SCC defect 20.8mm depth		
	Evaluation: 16.1mm	Evaluation: 20.9mm

Fig.6-3 Test result for deep SCC

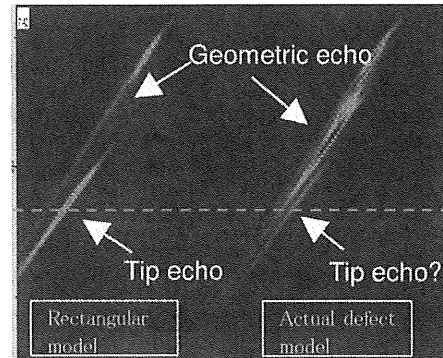
#### 4. 原子炉容器で検出された形状の欠陥への適用性

今回開発した探触子は前述したように一般的な形状のスリットや SCC に対してはサイジング精度の向上がみられた。この探触子の原子炉容器セーフエンドで検出されたような深くて細長く、かつ先端の長さが短い SCC に対する有効性を確認するために UT シミュレーションを用いて評価を実施した。

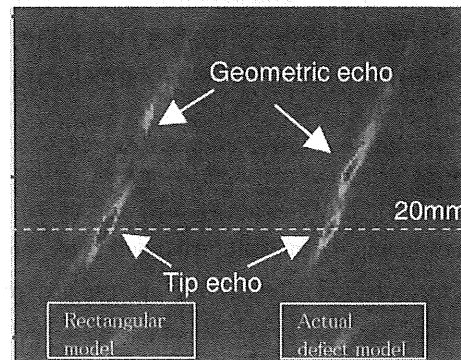
シミュレーションは現行の探触子と TRL マトリックスアレイ探触子を矩形スリットと原子炉容器セーフエンドで検出された欠陥形状に適用したときの探傷波形を求めた。結果を Fig. 7 に示す。矩形スリットに対しては現行法でも明瞭に端部エコーを検出しているが、深くて細長く、かつ先端の長さが短い欠陥に対しては現行法では端部エコーが微弱である上に形状エコーが大きくなるため、端部エコーの識別が困難である。一方 TRL マトリックスアレイ探触子では深くて細長く、かつ先端の長さが短い欠陥の先端エコーの信号レベルも高く、形状エコーとも分離できているため端部エコーの識別が容易でサイジングが可能となっている。これはマトリックスアレイでは超音波ビームが点集束されるため、細い欠陥の先端エコーのみを捉えることができたためと考えられる (Fig. 8 参照)。以上から、今回開発した探触子は深くて細長く、かつ先端の長さが短い SCC に対しても有効であると推定される。



Simulation model



Conventional UT



Matrix phased UT

Fig.7 UT simulation results

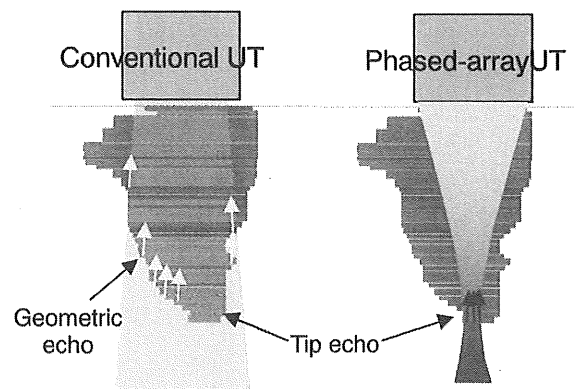


Fig.8 Beam Focusing Image

## 5. 結言

今回、蒸気発生器セーフエンドおよび原子炉容器セーフエンド溶接部で検出された軸方向欠陥に対して内面からの UT サイジング精度の向上を目的にフェーズドアレイ技術を使った探触子を開発した。探触子は欠陥深さに応じて小型 TRL フェーズドアレイと TRL マトリックスアレイの 2 種類とした。

蒸気発生器セーフエンドで検出されたような一般的な形状のスリットや SCC の試験体に対して開発した手法は現行法より高い欠陥サイジング精度が得られた。原子炉容器セーフエンドで検出されたような深くて細長く、かつ先端の長さが短い形状の結果に対してはシミュレーション評価を行い、開発した手法は現行法では困難であった欠陥サイジングが可能となった。今後、深くて細長く、かつ先端の長さが短い欠陥に対しては SCC 試験体を製作して本手法の有効性を実験的にも確認していく。また、実機適用化に向けた準備も進め、今後セーフエンドに指示が検出されても適切な欠陥サイジング手法を適用し、原子力プラントの保全に努めていく。

## 参考文献

- [1] S.Kawanami”7<sup>th</sup> international conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components”, 2009