

# BWR炉内構造物のニッケル基合金溶接部に発見された 応力腐食割れの超音波探傷試験結果とその評価

-Evaluation on Ultrasonic Examination Methods applied to Ni-base Alloy Weld including  
Cracks due to Stress Corrosion Cracking found in BWR Reactor Internal-

日本原子力発電株式会社 発電管理室 青木 孝行	Takayuki AOKI
株式会社日立製作所 日立事業所 原子力設計部 炉内保全設計グループ 樋口 真一	Shinichi HIGUCHI
日本原子力発電株式会社 発電管理室 小林 広幸	Hiroyuki KOBAYASHI
株式会社日立製作所 日立事業所 原子力設計部 炉内保全設計グループ 清水 祢人	Sadato SHIMIZU

A Ni-base alloy weld, including cracks due to stress corrosion cracking found in the reactor internal of the oldest BWR in Japan, Tsuruga unit 1, in 1999, was examined by three (3) types of UT method. After this examination, a depth of each crack was confirmed by carrying out a little excavation with a grinder and PT examination by turns until each crack disappeared. Then, the depth measured by the former method was compared with the one measured by the latter method. In this fashion, performances of the UT methods were verified. As a result, a combination of the three types of UT method was found to meet the acceptance criteria given by ASME Sec.XI Appendix VIII, Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems-Supplement 6.

In this paper, the results of the UT examination described above and their evaluation are discussed.

**Keywords :** Boiling Water Reactor, Ni-base Alloy, Stress Corrosion Cracking, Ultrasonic Examination, TOFD

## 1. 緒言

1999年12月、日本原子力発電(株)敦賀発電所1号機(沸騰水型軽水炉(BWR:Boiling Water Reactor))の炉内構造物の一つであるシラウドサポートに多数のひび割れが発見された。<sup>[1]</sup>(Fig.1) 調査の結果、原因はシラウドサポート溶接部(ニッケル基合金:インコネル182)に発生した応力腐食割れ(以下、SCCという)であることが判明した。(Fig.2) この調査の中で、原子炉圧力容器(以下、RPV:Reactor Pressure Vesselと略す)の外面からシラウドサポートと

RPVとの溶接部に対して超音波探傷試験(以下、UT試験といふ)が実施され、当該溶接部に発生したSCCの検出性やサイジング能力が調査された。このUT試験後、RPV内部から接近し、当該SCC発生部の表面を深さ約0.5mm毎を目標にグラインダー研削し、その都度、液体浸透探傷試験(PT)を実施して欠陥指示が無くなるまでこの作業を繰り返すという方法でひび割れの実際の深さを測定した。

この実測結果とUT試験結果を比較、評価することによって本UT試験手法の性能を評価、検証したので、その結果について以下に述べる。

## 2. 実施したUT試験の特徴と意義

### (1) UT試験を実施した溶接部の特徴

多数のひび割れ(SCC)が発見された溶接部は、シラウドサポートとRPVとの溶接部(以下、H9溶接部といふ)であるが、この溶接部の周方向約1m長

◆連絡先：青木 孝行

〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町1-1(美土代ビル)  
日本原子力発電(株) 発電管理室  
E-mail : takayuki-aoki@japc.co.jp

さについてUT試験を実施した。

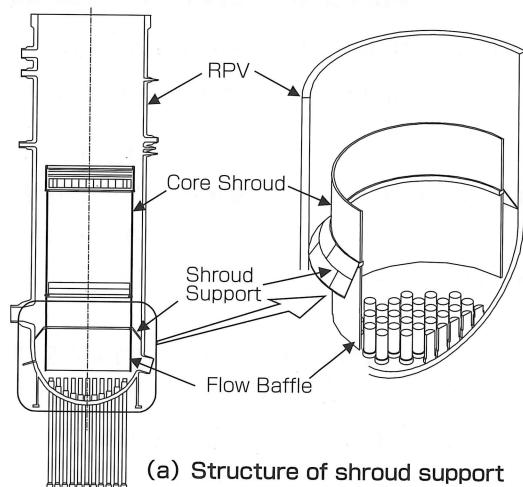
この溶接部の特徴としては、下記があげられる。

- ①BWRの実環境下に約30年という長期間、晒されて発生した自然欠陥(SCC)を内包している。
- ②当該溶接部はUT検査が難しいと言われている、異方性の高いインコネル溶接金属でできている。
- ③当該溶接部は圧力バウンダリーであるRPV本体に直接接続している。

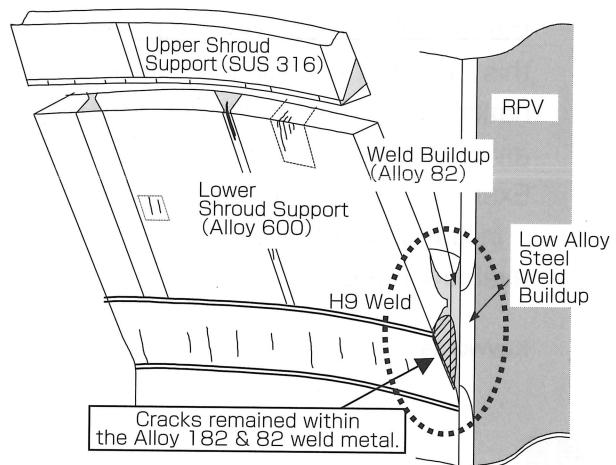
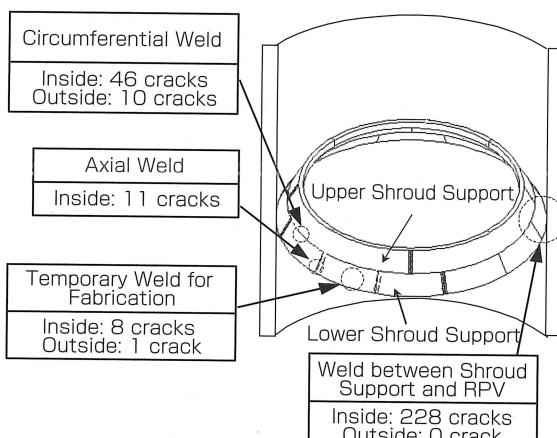
## (2) 本UT試験の意義

今回実施したUT試験は次に示す点において従来試験・研究と大きく異なる特徴を備えていると考えられる。

- ①BWRの実環境で発生した自然欠陥(SCC)に対するUT試験の探傷性能を確認できる。



(a) Structure of shroud support



(b) Location and number of cracking

Fig.1 Structure of the shroud support and locations of cracking

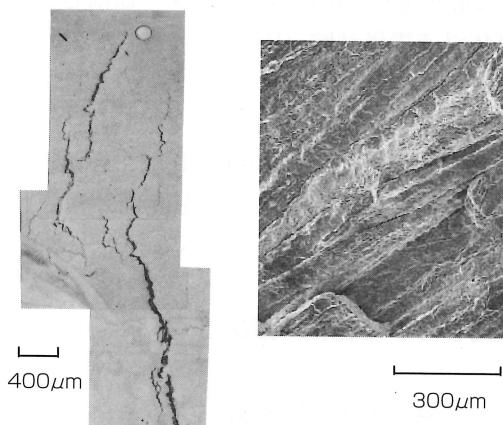


Fig.2 Typical example of SCC observed at the H9 weld

- ②UT試験後、欠陥部を徐々に削り取って実際の欠陥寸法を確認し、その結果をUT試験結果と比較することによってUT試験性能を検証できる。
- ③RPV外表面側から厚肉のRPV本体を通して探傷するUT試験方法が最重要機器であるRPV本体（低合金鋼部分）の健全性を判定できる能力を有しているか否か判断できる。

## 3. UT試験方法

### 3-1) モックアップ試験体による基礎試験

実機のひび割れ(SCC)を探傷する前にモックアッ

試験体を用いた基礎試験を実施した。以下にその概要を述べる。

### (1) 試験体の概要

用いた試験体の構造、寸法および材質をFig. 3に示す。同試験体には、模擬欠陥として、H 9溶接部表面側から放電加工(EDM)により、幅約0.5mm、長さ約20mmのスリット(人工欠陥)を付与した。スリット深さ(Da)はRPV胴側の低合金鋼肉盛とH 9溶接部側のインコネル82肉盛との境界を基準“0”として、RPV胴側を(-)、H 9溶接部側を(+)として-4mm～+2mmの範囲で、4ケースとした。

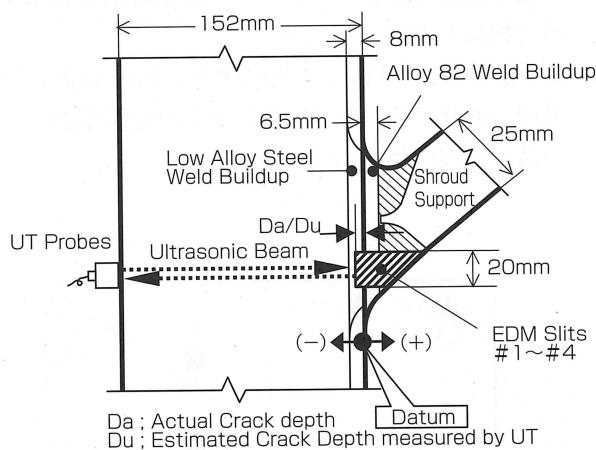


Fig.3 Mockup of H9 Weld

### (2) UT試験方法

#### ① 適用したUT手法

適用したUT手法は次の3種類とし、Fig. 3に示すように、全てRPV胴の外表面側から探傷する方法とした。

- a) 垂直探傷法(縦波0°)
- b) 斜角探傷法(横波45°)
- c) TOFD法(Time of Flight Diffraction)

a)、b)は従来のISIで一般的に適用されている手法であり、c)は1990年代から国内でも、主として欠陥サインジングへの適用化が進んできた手法であることから、これらの3手法を組合せて適用することとした。

#### ② 適用したUT試験装置

##### a) 探触子

一般に、超音波の周波数は高い方が微細なひびの検出性に優れている。逆に、周波数が低い方が結晶粒界での散乱や粒界ノイズが比較的少なく、音波の透過性は良好である。その反面、微細なひびの検出性が低下

する。<sup>[2]</sup>また、インコネル溶接金属ではフェライト系材料と比較して結晶粒界での散乱が著しく、粒界ノイズが高い。音波の減衰が著しいのも特徴である。<sup>[3]</sup>このため、本試験ではインコネル溶接金属のうち、RPV本体(フェライト系材料)に近い領域に的を絞って、欠陥検出性と音波の透過性を両立させた下記探触子を各UT手法に応じて選定して適用した。

\*探触子型式：一振動子型探触子

\*サイズ： $\phi$  12.7～35 mm

\*周波数：3～5 MHz

#### b) 探傷器

探傷器はAスコープ表示で一般的なDC波形とRF波形に加え、TOFD波形のBスコープ(走査モードによってはDスコープ)表示が可能な日立製の超音波探傷装置を適用した。

#### ③ 感度校正方法

##### a) 垂直探傷法および斜角探傷法

モックアップ試験体のRPV外面から深さ3/4T位置に $\phi$ 6.4mmのドリル横穴を付与し、そこからの反射エコーの高さをCRT80%に調整した後、感度を14dB上げて探傷感度とした。これは試験体に付与したEDMスリットの先端からのエコー高さが概ねCRT50%となる感度である。

##### b) TOFD法

モックアップ試験体に付与したEDMスリットの先端からのエコー(S)が周辺からのノイズエコー(N)と分離して識別できる感度(S/N比が6dB以上)で、RF波形におけるノイズレベルが約10%となる感度を探傷感度とした。

##### ④ 探傷方法

モックアップ試験体の外側にマグネット固定式の軌道を取付けて、自動走行による探傷方法とした。なお、これは後述する実機適用方法と同一である。

## 3-2 実機溶接部のUT試験

### (1) 探傷試験範囲

SCCはH 9溶接部全長にわたって発見されたが、そのうちの12個のインディケーションを含む長さ約1mの範囲について、RPV外面からUT試験を実施した。試験範囲のスケッチをFig. 4に示す。

### (2) UT試験方法

#### ① 適用したUT手法、装置、感度校正方法

前項の基礎試験の結果を踏まえ、実機SCCに対する

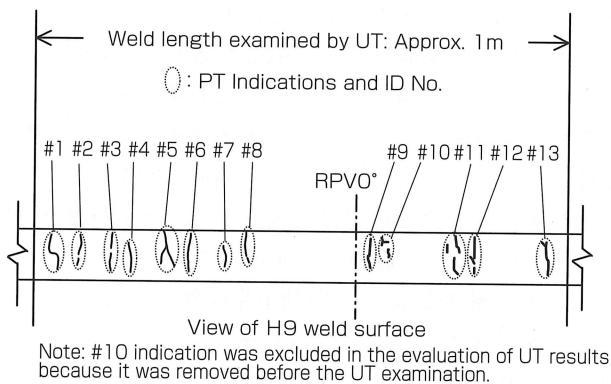


Fig.4 SCC Indications on H9 Weld examined by UT

UT手法は、垂直探傷法（縦波0°）、斜角探傷法（横波45°）、TOFD法の3手法を全て適用することとした。適用した試験装置、感度校正方法についても基礎試験と同一である。

## ②探傷方法

RPV外面側の保温材を取り外し、RPV胴にマグネット固定式の軌道を取り付けた。探触子を搭載した駆動装置がその軌道上を走行し探傷するという方法を採用した。(Fig. 5) 駆動装置の制御は制御装置で行い、超音波データの収録はデータ収録装置で行うとともに、評価に必要な各種データの処理はデータ処理装置で行った。

なお、このUT試験後、RPV内側からグラインダーで各ひび割れを深さ約0.5mm毎に研削し、その都度、PTを実施して欠陥指示が無くなるまでこの作業を繰り返し、櫛型ゲージ等で深さを測定するという方法で各ひび割れの実際の深さを測定した。

## 4. 試験結果

### 4-1) モックアップ試験体による基礎試験の結果

モックアップ試験体による基礎試験の結果をFig. 6に示す。なお、同図の横軸中央がRPV本体とH9溶接部を含むシュラウドサポート側との境界位置に相当し、左半分がRPV本体側、右半分がシュラウドサポート側である。

本試験の結果、下記のことが明らかとなった。

- (1) 3手法とも、低合金鋼肉盛とインコネル82肉盛との境界前後の深さのスリット（人工欠陥）4個をすべて検出した。
- (2) 3手法とも、UTによる欠陥深さ(Du)の測定は可能であり、特にTOFD法による測定結果が実際の深さに近い値を示した。

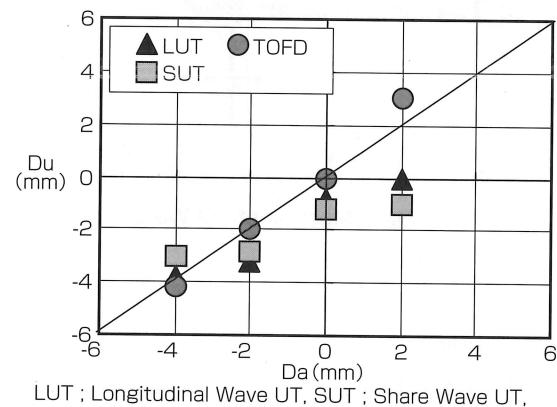


Fig.6 UT Results in Mockup Test

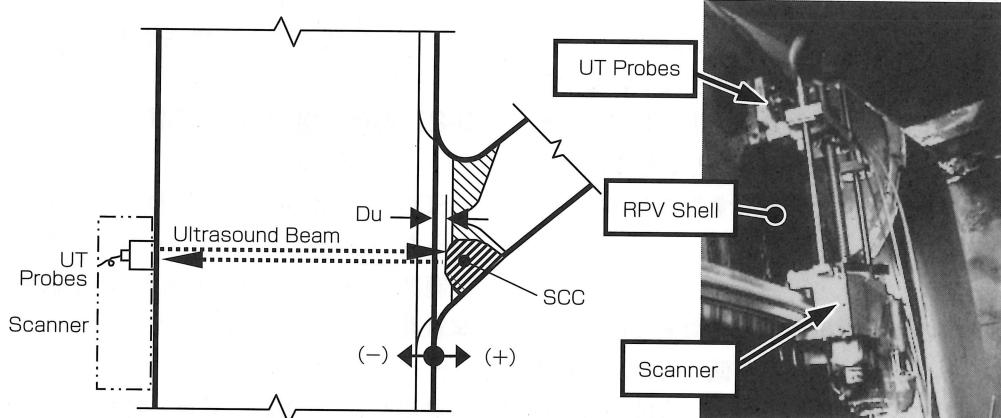


Fig.5 UT Machine used in this examination

## 4-2) 実機溶接部のUT試験結果

H 9 溶接部の探傷試験範囲を前述のUT手法で探傷した結果について以下に述べる。

### (1) 欠陥検出の結果

垂直探傷法、斜角探傷法（横波45°）およびTOFD法の3手法を適用した結果、欠陥を検出できたのは、SCC12個中、それぞれ9個、7個、9個であった。また、3手法のいずれかで検出できたSCCを全て集計すれば、結果として、探傷対象であるSCC12個中、全てのSCCを検出できることになる。(Fig.7) それぞれの探傷法で得られた探傷波形の代表例をFig.8、Fig.9およびFig.10に示す。垂直探傷法およびTOFD法では、SCCからの反射信号に加え、Fig.8およびFig.10に示すように、インコネル82肉盛部と低合金鋼肉盛との境界（境界A）、および低合金鋼肉盛とRPV胴母材との境界（境界B）からの信号を観察できるケースがあり、それらの信号の時間軸上での出現位置や波高値を確認することによって、SCCからの反射信号の出現位置や波高値の評価、あるいは波形の分析評価が容易になることが分かった。この意味で界面A、Bからの反射波は欠陥を正確に検出する上で、極めて有効な参考情報である。なお、斜角探傷法ではこれらの境界信号は検出できないが、垂直探傷法で得られた境界A位置を参考にして、波形の分析を実施することが可能である。

### (2) 欠陥サイジングの結果

UT試験でひび割れと識別できた12個のSCCについて、UT試験で評価した深さ（Du）とUT試験後に当該SCCを研削、除去し、直接、櫛形ゲージ等で実測した深さ（Da）との関係を探傷方法別にプロットした結果をFig.11に示す。ここで、深さとは前述のモックアップ

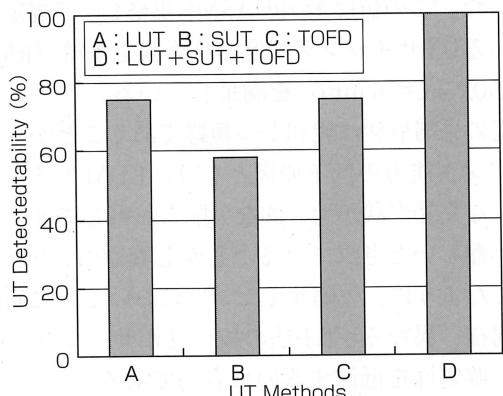


Fig.7 UT Methods and Detectability

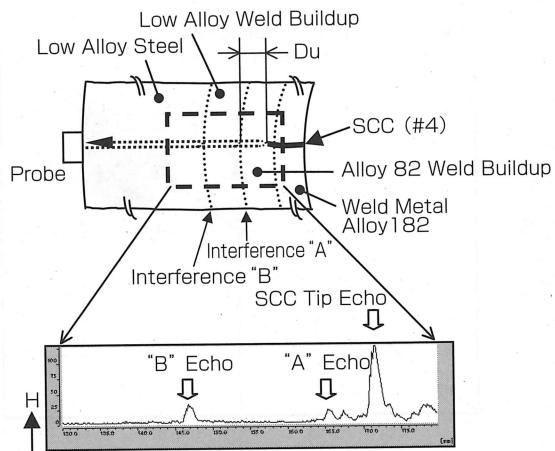


Fig.8 Typical Signals of LUT on CRT Screen

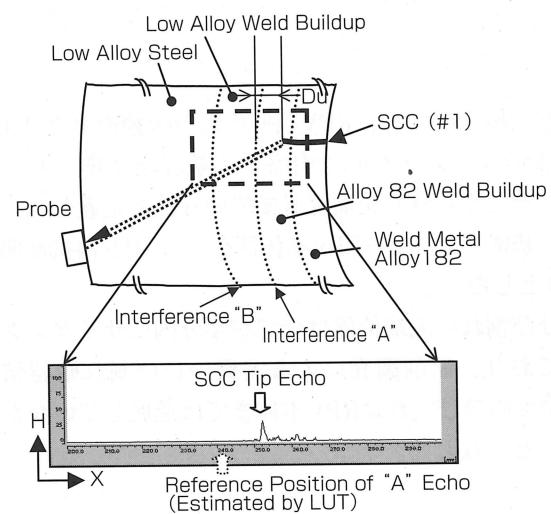


Fig.9 Typical Signals of SUT on CRT Screen

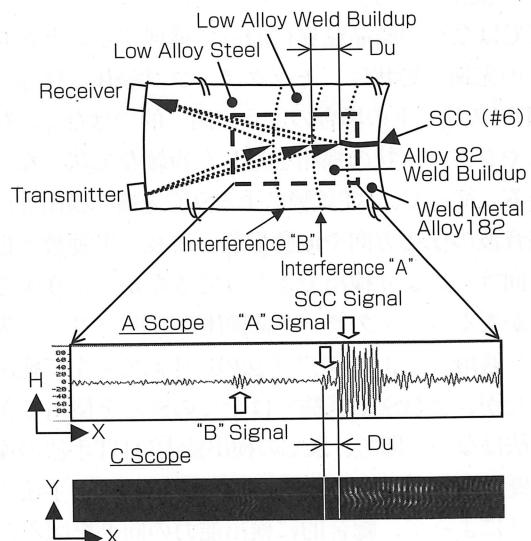


Fig.10 Typical UT Signals of TOFD

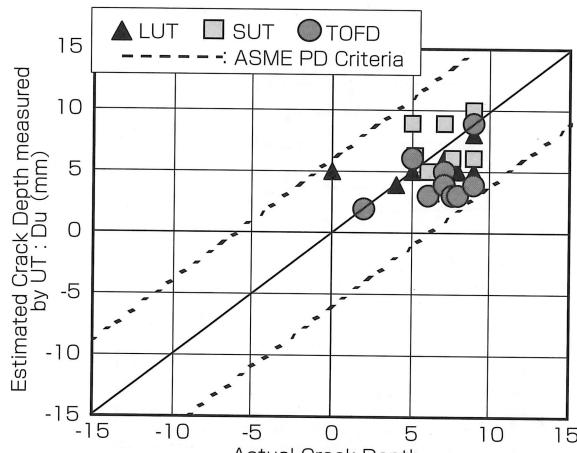


Fig.11 UT Results on Depth-Sizing

試験の場合と同様、RPV胴側の低合金鋼肉盛とH 9溶接部側のインコネル82肉盛との境界を基準“0”とし、そこからSCC先端位置までの寸法と定義した。なお、基準“0”からRPV本体側を(−)、H 9溶接部側を(+)とした。

ひび割れの先端位置は全て右半分内にサイジングされており、研削調査による実機のひび割れ確認結果（全てのひび割れはRPV本体までは進展していなかった）と一致した。

## 5. 試験結果の分析と考察

### (1) 欠陥検出能力

①SCCは金属の結晶粒界に沿って進展することから、その先端の形状は、モックアップ試験体に付与したEDMスリットの場合のように画一的ではなく、枝別れやジグザグ状の様相を呈した複雑な形状になっている。従って、UT試験によるSCC先端の検出性は、超音波の伝播方向や波動形態（波長、振動数、振動方向等）により検出できたりできなかったりすることがある。モックアップ試験体のEDMスリット先端は、適用した3つのUT手法のいずれでも全て検出できたが、実機SCC試験では全てのSCCを検出できた手法はない。即ち、SCCの検出能力はUT手法の違いで優劣をつけるのは難く、特性の異なるUT手法の組合せによって、総合的に検出能力の向上を図るのが望ましいと考えられる。

②一方、インコネル溶接金属の超音波伝播特性は3-1)

(2) 項で述べたように、フェライト系材料と比較して減衰やノイズが著しいことで知られている。現に、今回実施した実機SCCのUT試験ではインコネル溶接金属内を通過する超音波ビーム路程が約10mm程度までは欠陥信号を識別できたが、これ以上のビーム路程の領域では超音波の減衰と粒界ノイズが著しい状態が観察され、ひび割れの特定は難しくなる可能性がある。これに対してRPV本体はフェライト系材料であることから、減衰やノイズが少なく、4-2) (1) 項に述べたように、異種金属境界Aと境界Bからの信号でさえ検知可能な感度であった。従って、本試験で用いたUT手法を適用すれば、RPV本体内での欠陥はもとより、H 9溶接部の表面に発生し、RPV本体の低合金鋼肉盛との境界から約10mm程度まで進展してきたSCCでもRPV外側から検出可能であると言える。

③一般にUT試験では試験片によってCRTの時間軸を校正し、試験部位の構造図上の寸法と波形検出位置を対応させて欠陥位置を特定するが、本試験では前述の異種金属境界Aと境界Bからの境界信号がCRT時間軸上に出現するので、これをSCCの検出やサイジングの評価の参照信号として活用した。この信号で当該部の構造上の実寸法を知ることができることになり、欠陥波形の出現領域を見定められる等、欠陥検出やサイジングの精度向上に有効である。

### (2) 欠陥サイジング能力

①モックアップ試験体のEDMスリットのサイジングでは、誤差の平均値が−0.6mmで、標準偏差 $\sigma$ の2倍が±2.4mm (RMS誤差1.1mm) であったのに対し、実機SCC試験では誤差の平均値が−1.1mmで、標準偏差 $\sigma$ の2倍が±5.2mm (RMS誤差2.5mm) となった。この値は米国のASME規格4) で規定されているUTサイジング精度の良否判定基準 (RMS誤差≤0.25in.= 6 mm) を満足している。

②SCCの先端形状は鋭利かつ複雑であることから、サイジング能力の低下原因となり、EDMスリットのような先端形状が画一的な欠陥と比較してサイジングが難しいとされている。しかしながら、Fig.11で示したように、欠陥サイジングにおいても欠陥検出と同様、異なるUT手法の組合せがサイジング能力の不確定性を低減するのに有効である。

③欠陥サイジングにおいても、欠陥検出と同様、イン

コネル肉盛部と低合金鋼肉盛との境界（境界A）および低合金鋼肉盛とRPV胴母材との境界（境界B）からの信号を利用すれば、欠陥サイジング能力を高められる。たとえば、CRT時間軸上で確認された境界Aの信号出現位置を $D_u=0\text{mm}$ とすることにより評価を補正し、これによってサイジング精度を向上させることができる。

④一般に、構造物を検査する場合、「構造物の強度」「経年変化事象の進展」および「検査手法の性能」の間には一定の関係がある。すなわち、下式が成立つように検査のサイジング精度を限定すれば、次回点検時までの当該構造物の健全性を保証できる。<sup>[5]</sup>

$$a_0 + \Delta E + \Delta a < a_c$$

ここで、

$a_0$ ：検査による欠陥深さの測定値

$\Delta E$ ：検査による欠陥深さの測定誤差

$\Delta a$ ：次回点検時までの欠陥深さ進展量（予測値）

$a_c$ ：限界き裂深さ

したがって、検査手法に要求されるサイジング精度 $\Delta E$ は下記で与えられる。

$$\Delta E < a_c - a_0 - \Delta a$$

発見されたSCCはほとんどが軸方向の割れであり、深さはRPV本体に達しておらず、インコネル溶接金属内に留まっていた。これらのSCCを保守的な想定欠陥としてモデル化し、有限要素法によるシュラウドサポートの強度評価を実施した。想定した欠陥は $D_a = 0\text{ mm}$ 相当のスリット、すなわちインコネル溶接部の全断面を包含する深さと長さのスリットがRPV方位で $1^\circ$ 毎に、またそれに加えて $55\text{mm}$ 幅の欠損がRPV方位で $5^\circ$ 毎に存在するものとした。その結果、それでもシュラウドサポートの機能は維持されるとの結論を得た。<sup>[6]</sup>この事から、本UT試験で確認されたサイジング精度があれば、シュラウドサポートの健全性を判定できる十分なサイジング能力を有していると評価される。

一方、RPVの場合、容器胴板厚の $1/4$ の欠陥深さがあっても脆性破壊しないように温度管理されている。したがって、RPV本体に対する $\Delta E$ は保守的に下記のように評価できる。

$$\begin{aligned} \Delta E &< a_c - a_0 - \Delta a \doteq t/4 - \Delta a \\ &= 40 - 0.03 \\ &\doteq 39 \end{aligned}$$

ここで

$t = 160\text{mm}$  (BWRの例)

$a_c - a_0$  : SCCがRPV本体（低合金鋼）とインコネル溶接部の境界にまで達している場合を想定し、  
 $a_c - a_0 = t/4$ とした。

$\Delta a$  : RPV本体（低合金鋼）とインコネル溶接部の境界にまで達したSCCがその後は低合金鋼中を疲労き裂として進展すると仮定して求めた40年間のき裂進展深さ<sup>[7]</sup>

上記のように、RPV本体を対象とするUT検査手法に対するサイジング精度は、 $\Delta E < 39\text{mm}$ を満たす精度が要求される。本試験で適用したUT手法はサイジング誤差の標準偏差 $\sigma$ の2倍が $\pm 5.2\text{mm}$  (RMS誤差 $2.5\text{mm}$ ) であり、この値がRPV本体を通してインコネル溶接部内のSCCを探傷した結果であることを考えると、RPV本体内の欠陥については更に精度良くサイジングできるものと考えられる。この事から3つのUT手法を組合せた手法はRPV本体の健全性も判定できる十分なサイジング能力を有していると評価される。

## 6. 結言

長期間運転後のBWRで発見されたインコネル溶接部のSCC（自然欠陥）をUT試験した結果とUT試験後に当該SCCを徐々に削り取って直接ひび割れ深さを測定した結果を比較し、適用したUT手法の性能について評価、検証した。以下に、本研究で得られた知見を要約して示す。

- (1) 本試験で用いた3種類のUT手法はそれぞれ特性が異なり、短所を相互補完できる関係にある。これら3つのUT手法を組合せることにより、欠陥検出精度およびサイジング精度を著しく向上させることができる。
- (2) 本試験で用いた3種類のUT手法の組合せはシュラウドサポートのインコネル溶接部に発生したSCCがRPV胴にまで進展しているか否かを判別でき、RPV本体、シュラウドサポート両者の健全性を評価できる十分な能力を有している。
- (3) 本試験で用いた3種類のUT手法の組合せはインコネル溶接金属内を通過するビーム路程が $10\text{mm}$ 程度であれば、インコネル溶接部内の欠陥であっても検出およびサイジングが可能である。
- (4) CRT画面上に現れた異種金属境界部からの信号は欠陥検出やサイジングに必要なUT波形、検出位置を評価する上で有効に活用できる。

## 参考文献

- [1]火力原子力発電技術協会；平成13年版（平成12年度実績）原子力施設運転管理年報、406頁-411頁（2001年）。
- [2]富士岳、ほか；新技術開発センター、非破壊検査マニアル、（減衰）（探傷周波数の選定）、236頁-251頁。
- [3]福田、ほか；インコネルアロイ600単結晶及び双結晶の超音波伝搬挙動、溶接学会全国大会講演 第69集（2001-10）。
- [4]ASME Code Sec.XI App.VIII “Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems-

Supplement 6.” (2004).

- [5]青木孝行、ほか；保全学の構築に向けて(4)-「保全工学」構築のアプローチー、日本保全学会誌「保全学」Vol.3、No.4(2004)。
- [6]竹内公人、林正明；敦賀発電所1号機シラウドサポートの応力腐食割れについて、日本機械学会M&M2000（2000年8月）。
- [7]日本機会学会；発電用原子力設備規格 維持規格（2000年5月）、解説(II)-1-40頁。

（平成17年2月16日）

## お詫びと訂正

「保全学」Vol.4 No.1「学術論文：BWR環境下で長期間使用されたニッケル基合金の応力腐食割れ」39ページのFig.10におきまして、下記のような誤りがありました。訂正いたしますとともににお詫び申し上げます。

## 《誤》

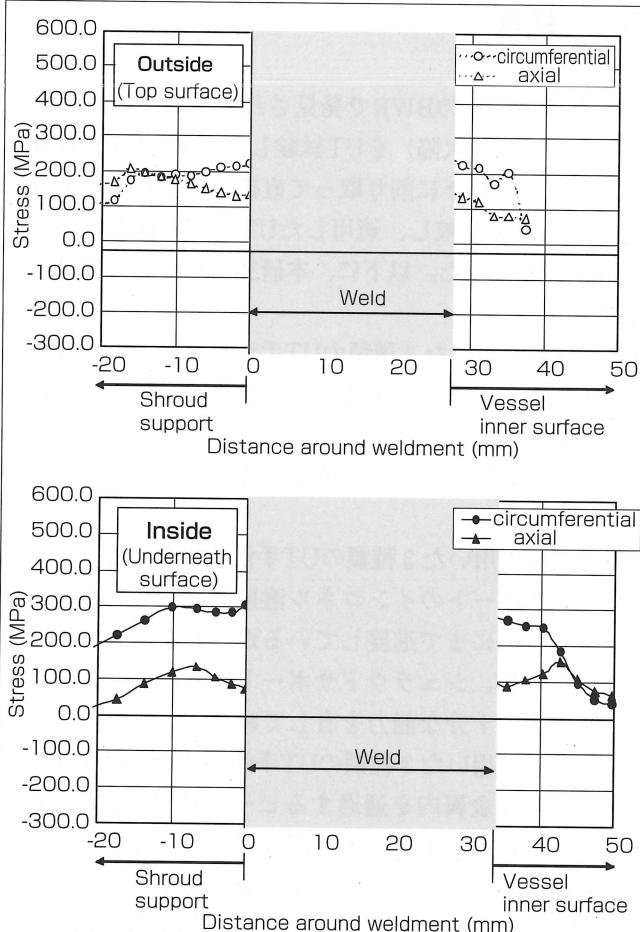


Fig.10 Analytical results of stress distribution around the welds

## 《正》

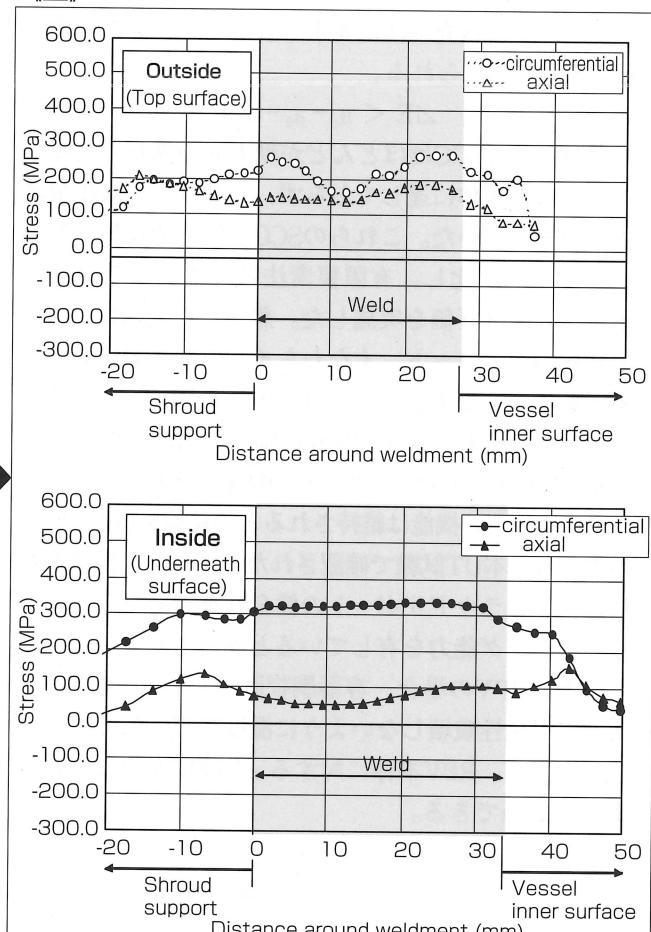


Fig.10 Analytical results of stress distribution around the welds

## 図の訂正

「保全学」Vol.3 No.4 「学術論文：PWR炉内構造物の中性子照射型応力腐食割れに対する保全対策の検討 - Maintenance method for Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking of PWR core internals -」33ページのFig.5 2-Loop estimation curve of failed baffle former bolt のグラフでプロット点が抜けておりましたので以下の様に訂正願います。

《誤》

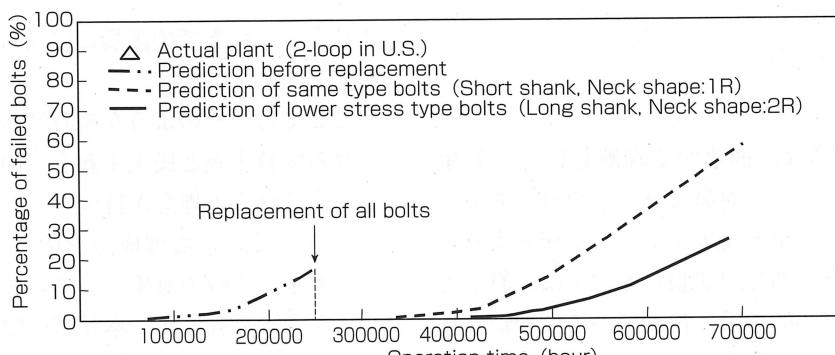


Fig.5 2-Loop estimation curve of failed baffle former bolt



《正》

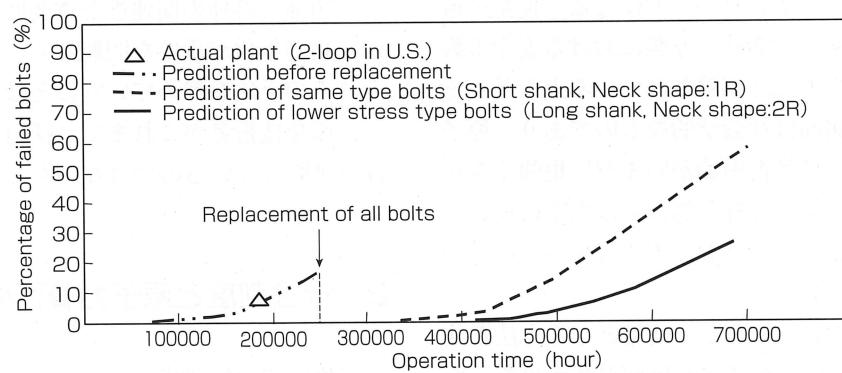


Fig.5 2-Loop estimation curve of failed baffle former bolt