

# 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)発電管理室	青木 孝行	Takayuki AOKI
日本原子力発電(株)発電管理室	小林 広幸	Hiroyuki KOBAYSHI
(株)日立製作所原子力設計部	樋口 真一	Shinichi HIGUCHI
(株)日立製作所原子力設計部	清水 禎人	Sadato SHIMIZU
(株)日立製作所原子力品質保証部	井坂 克己	Katsumi ISAKA

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- Supplement6.

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ュラウドサポートに多数のひび割れが発見された[1]。(Fig.1)調査の結果、原因はシュ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、原子炉压力容器(以下、RPV: Reactor Pressure Vesselと略す。)の外側からシュラウドサポートとRPVとの溶接部に対して超音波探傷試験(以下、UT試験という。)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。

連絡先: 青木 孝行、〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町1番地1(美土代ビル)日本原子力発電(株)発電管理室、電話:03-4415-6008、  
E-mail: takayuki-aoki@japc.co.jp

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、その結果を報告する。

### 2. 実施したUT試験の特徴と意義

#### 2.1 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、シュラウドサポートとRPVとの溶接部(以下、H9溶接部という。)であるが、この溶接部の周方向約1m長さについて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。

#### 2.2 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

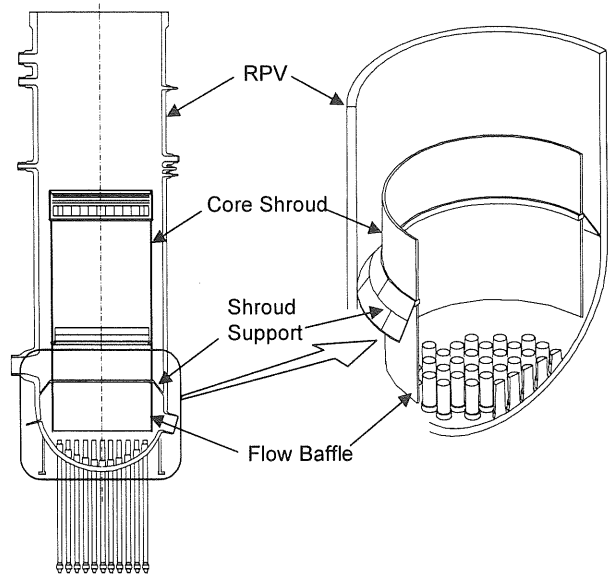
する UT 試験の探傷性能を確認できる。

- ② UT 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。
- ③ RPV 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。

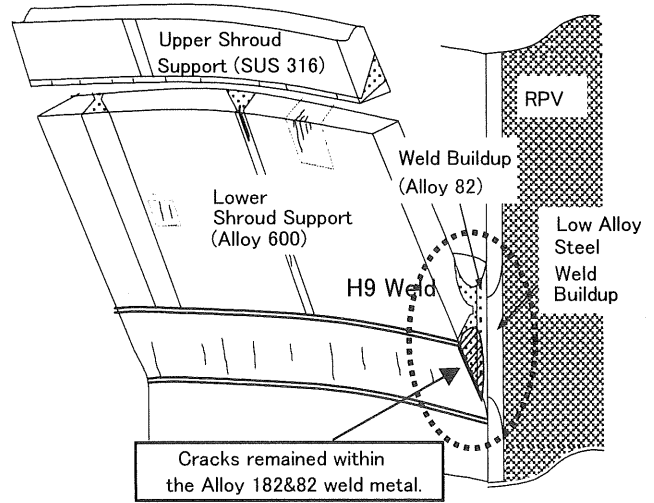
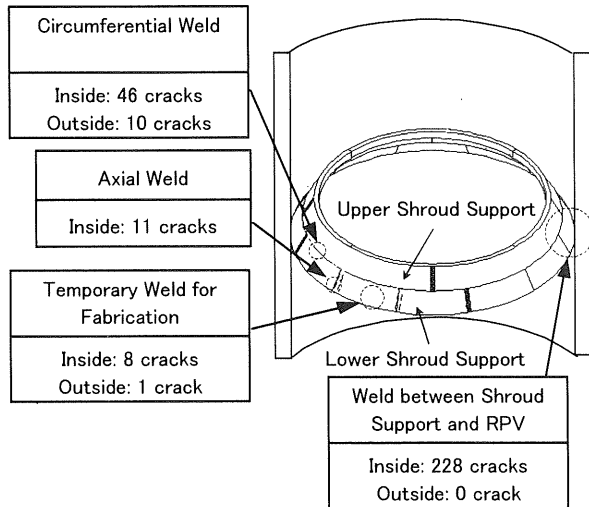
### 3. 実機溶接部の UT 試験要領

#### 3.1 探傷試験範囲

SCC は H9 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 1 m の範囲について、RPV 外面から UT 試験を実施した。



(a) Structure of shroud support



(b) Location and number of cracking

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

#### 3.2 UT 試験方法

##### ①適用した UT 手法

実機試験前に実施したモックアップ試験体の基礎試験の結果を踏まえ、実機 SCC に対する UT 手法は、垂直探傷法（縦波  $0^\circ$ ）、斜角探傷法（横波  $45^\circ$ ）、TOFD 法の 3 手法とした。

##### 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付け、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。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。

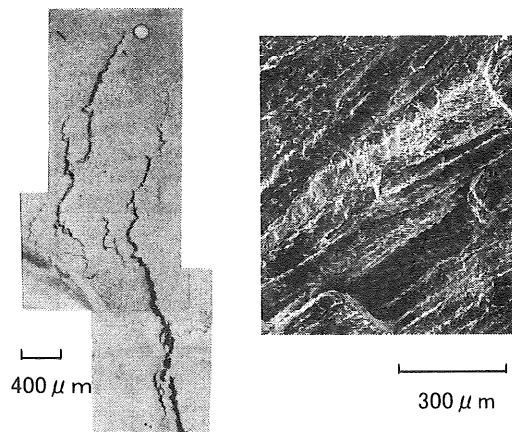


Fig.2 Typical example of SCC observed at the H9

#### 4. 実機溶接部の試験結果

H9 溶接部の探傷試験範囲を前述の UT 手法で探傷した結果は次の通りであった。

##### 4.1 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、対象とした 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 を検出できたことになる。（Fig.3）

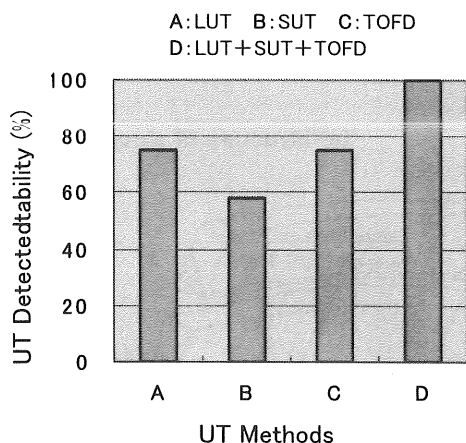


Fig.3 UT Methods and Detectability

##### 4.2 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、楕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.4 に示す。ここで、深さとは、RPV 胴側の低合金鋼肉盛と H9 溶接部側のインコネル 82

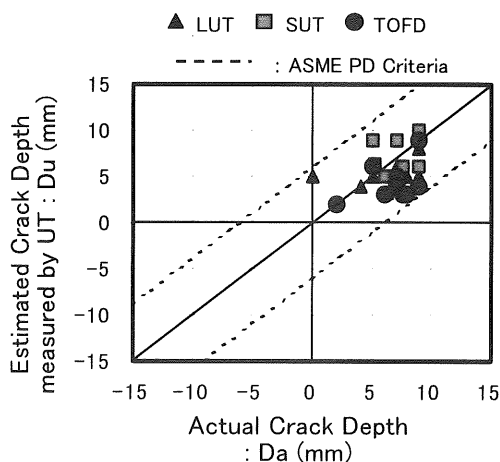


Fig.4 UT Results on Depth-Sizing

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 (-)、H9 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。また、深さ測定誤差の平均値は -1.1mm で、標準偏差  $\sigma$  の 2 倍が  $\pm 5.2\text{mm}$  (RMS 誤差 2.5mm) であった。この値は米国の ASME 規格[2]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  $\leq 0.25\text{in.} = 6\text{mm}$ ) を満足していた。

#### 5. 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 10mm 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] ASME Code Sec.XI App. VIII “Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems-Supplement6” (2004)