

# 水中レーザ溶接向け渦電流探傷試験の適用性評価

## Applicability Evaluation of Eddy Current Testing for Underwater Laser Beam Welding

株式会社 東芝	小林 徳康	Noriyasu KOBAYASHI	Non Member
株式会社 東芝	糟谷 高志	Takashi KASUYA	Non Member
株式会社 東芝	上野 聡一	Souichi UENO	Non Member
株式会社 東芝	落合 誠	Makoto OCHIAI	Non Member
株式会社 東芝	湯口 康弘	Yasuhiro YUGUCHI	Member

### Abstract

We clarified a defect detecting capability of eddy current testing (ECT) as a surface inspection technique for underwater laser beam welding. An underwater laser beam welding procedure includes groove caving as a preparation, laser beam welding in groove and welding surface grinding as a post treatment. Therefore groove and grinded welding surface inspections are required underwater. We carried out defect detection tests using three kinds of specimens simulated a groove, reactor vessel nozzle dissimilar metal welding materials and a laser beam welding material with a cross coil ECT probe. From experimental results, we confirmed that it is possible to detect 0.3 mm or more depth electro-discharge machining slits on machining surfaces in all specimens and an ECT has possibility as a surface inspection technique for underwater laser beam welding.

**Keywords:** Eddy current testing, Defect detecting capability, Underwater laser beam welding, PWR, BWR

## 1. 緒言

加圧水型原子炉(PWR)および沸騰水型原子炉(BWR)の原子炉(圧力)容器や原子炉内構造物を対象に、応力腐食割れ(SCC)に対する予防保全、補修工法の一つとして、水中でのレーザ照射によるクラッド溶接工法の開発が進められている[1]。本水中レーザ溶接工法では、レーザ溶接対象面に開先加工を施した後、溶接を行い、溶接表面を研削加工する手順が検討されている。このとき、開先加工面と研削加工後のレーザ溶接面の水中環境における表面検査が要求される。その検査手法として渦電流探傷試験(ECT)が有力候補である。そこで、開先加工面およびレーザ溶接後の表面研削加工面を模擬し、各表面に放電加工(EDM)スリットを付与した試験体を用いて ECT による探傷試験を行い、欠陥検出性を評価した。ここでは、水中レーザ溶接施工の代表例として、PWR の原子炉冷却材出入口管台を選定した。

## 2. 模擬試験体

PWR 冷却材出入口管台の異材溶接継手部概略図を Fig.1 に示す。同図中の(a)開先加工面と(b)レーザ溶接後の表面研削加工面が表面検査の対象面である。

開先加工面の形状を模擬した試験体(TP-1-1)、材質を模擬した試験体(TP-1-2)、およびレーザ溶接後の表面研削加工面の材質と表面状態を模擬した試験体(TP-2)を準備した。TP-1-1、TP-1-2、および TP-2 の概略図を Fig.2、Fig.3、および Fig.4 に示す。

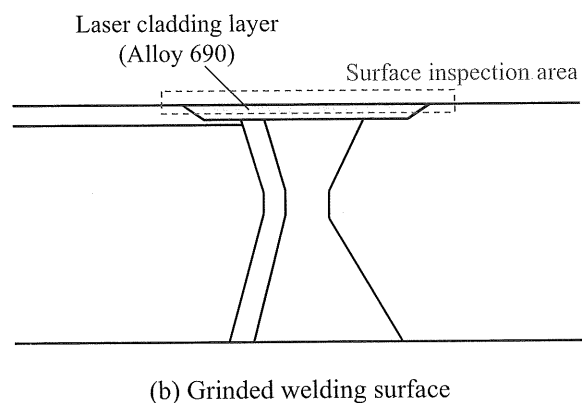
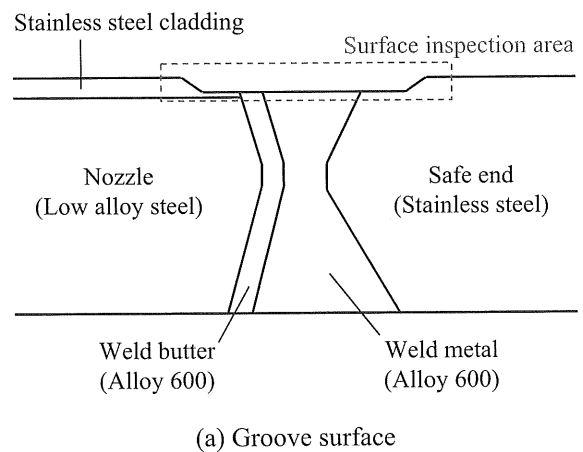


Fig.1 Schematic of dissimilar weld between reactor vessel and safe end

連絡先: 小林徳康, 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8, 株式会社東芝, 電話: 045-770-2307, E-mail: noriyasu.kobayashi@toshiba.co.jp

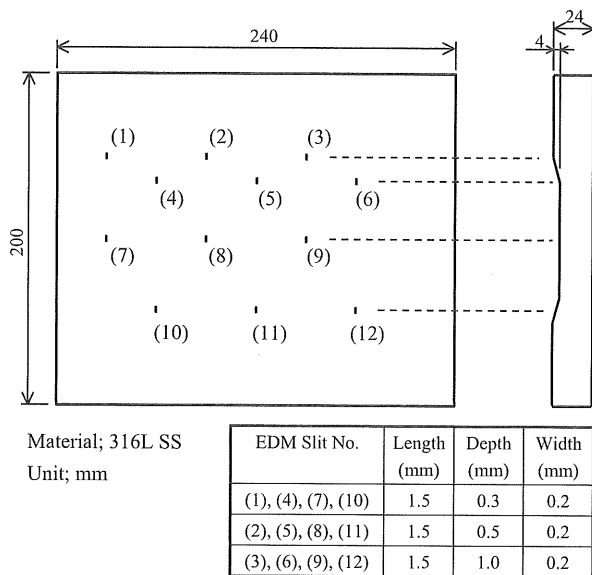


Fig.2 Schematic of TP-1-1

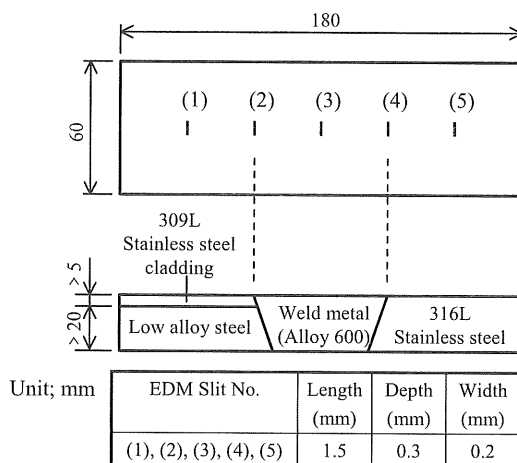


Fig.3 Schematic of TP-1-2

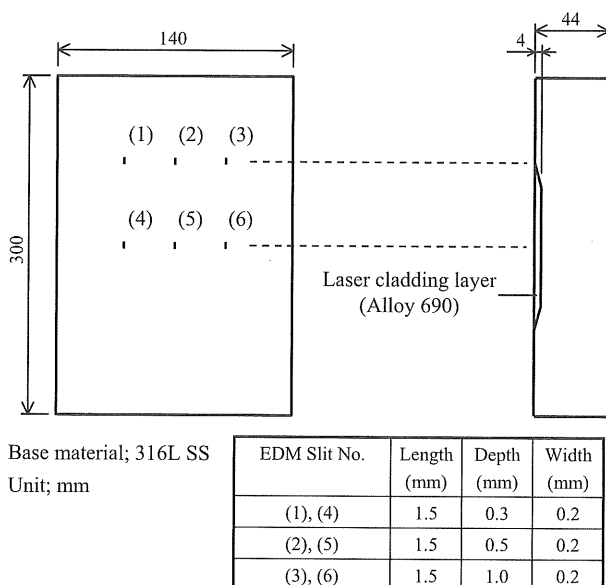


Fig.4 Schematic of TP-2

TP-1-1 では溶接部の開先面検査を模擬するために、SUS316L 板材を開先面の形状に加工した。開先面の各部（凸曲面、凹曲面、平面、傾斜面）における検出性確認のために、長さ 1.5mm、深さ（0.3mm から 1mm）、幅 0.2mm の EDM スリットを付与した。

TP-1-2 では異材継手部の表面検査を模擬するために、低合金鋼上に SUS クラッド溶接した部材と、SUS316L を 600 合金で溶接を行った。各材質および異材境界部における検出性確認のために、長さ 1.5mm、深さ 0.3mm、幅 0.2mm の EDM スリットを付与した。

TP-2 ではレーザ溶接部の表面検査を模擬するために、開先加工を行った SUS316L 母材の開先面に対し、耐食性の高い 690 合金のレーザ溶接を実施した後、表面の研削加工を行った。検出性確認のために、長さ 1.5mm、深さ（0.3mm から 1mm）、幅 0.2mm の EDM スリットを SUS316L 母材と 690 合金との境界部および 690 合金上に付与した。

### 3. 試験装置および方法

試験装置のブロック図を Fig.5 に示す。試験装置は、ECTプローブ、ECTデータ取得システム、X-Y スキャナ、スキャナコントローラ、ECTデータ解析システム、および模擬試験体から構成される。X-Y スキャナに取り付けた ECT プローブを模擬試験体表面に設置する。ECT データ取得システムは ECT プローブとスキャナコントローラに接続され、ECT プローブを模擬試験体表面上で二次元走査しながら探傷データを取得する。取得した探傷データは、ECT データ解析システムに送られ、振幅（感度）および位相角等から欠陥検出のための解析を行う。

探傷試験は Table1 に示す試験条件にて行った。使用した ECT プローブは単一プローブであり、試験コイルにはクロスコイルを用い、試験周波数 500kHz で探傷試験を行った。プローブの基準感度および位相角は、深さ 1mm、幅 0.3mm、長さがプローブ外形より長い EDM スリットを付与した SUS316L 製対比試験片による探傷信号の感度を 100%、位相角を 90° に、各々設定した。

各試験体での探傷試験に先立ち、対比試験片を用いて気中と水中でのプローブ性能比較を行った。Table2 に示すように、感度、位相角とも気中と水中での探傷において、同等の値を示した。この結果から、水中での探傷が欠陥検出性に影響を与えないことを確認した。この結果から各試験体での探傷試験は気中環境で行うこととした。

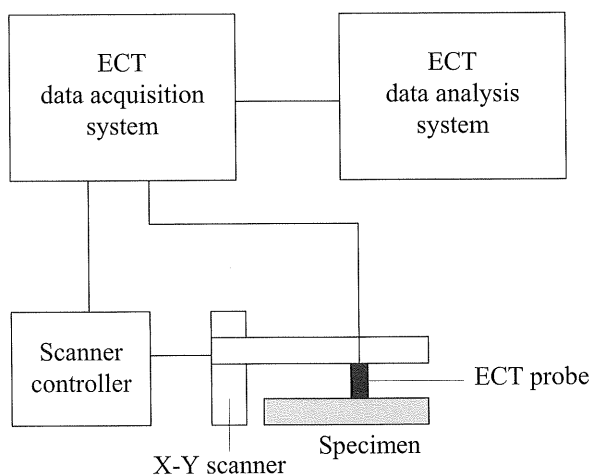


Fig.5 Block diagram of test equipment

Table1 Test conditions

ECT probe	Single probe
Test coil	Cross coil
Test frequency	500 kHz
Test atmosphere	In air
Specified sensitivity and phase angle	100 %, 90 deg.

Table2 Probe performance compared results between in-air and underwater

Test atmosphere	Sensitivity (%)	Phase angle (deg.)
In air	97	89
Underwater	99	89

各試験体を用いた全ての探傷試験において、EDM スリットによる信号の感度は、深さ 0.5mm 以上の場合、全て基準感度の 20%以上の指示であった。また、深さ 0.3mm の EDM スリットについては、基準感度の 20%未満の指示であった。

Table3 Test results of TP-1-1

EDM Slit No.	Depth (mm)	Surface figure	Material	Sensitivity*
1	0.3	Convex curve	316L SS	B
2	0.5	Convex curve	316L SS	A
3	1.0	Convex curve	316L SS	A
4	0.3	Concave curve	316L SS	B
5	0.5	Concave curve	316L SS	A
6	1.0	Concave curve	316L SS	A
7	0.3	Flat	316L SS	B
8	0.5	Flat	316L SS	A
9	1.0	Flat	316L SS	A
10	0.3	Incline	316L SS	B
11	0.5	Incline	316L SS	A
12	1.0	Incline	316L SS	A

\* A; 20 % or more, B; less than 20 %

#### 4. 試験結果

TP-1-1、TP-1-2 および TP-2 の探傷試験結果を Table3、Table4 および Table5 に、各々示す。ここで、模擬欠陥 (EDM スリット) 検出の判定は信号の感度、位相角等を基に行った。

開先加工面の形状を模擬した TP-1-1 の探傷試験結果から、凸曲面上、凹曲面上、平面上および傾斜面上に付与した全ての EDM スリットからの欠陥指示を確認した。開先加工面の材質を模擬した TP-1-2 の探傷試験結果から、SUS クラッド上、SUS クラッドと 600 合金との境界部、600 合金上、600 合金と SUS316L 母材との境界部および SUS316L 母材上に付与した全ての EDM スリットからの欠陥指示を確認した。レーザ溶接後の表面研削加工面の材質と表面状態を模擬した TP-2 の探傷試験結果から、SUS316L 母材と 690 合金との境界部および 690 合金上に付与した全ての EDM スリットからの欠陥指示を確認した。

Table4 Test results of TP-1-2

EDM Slit No.	Depth (mm)	Surface figure	Material	Sensitivity*
1	0.3	Flat	309L SS cladding	B
2	0.3	Flat	Boundary between 309L SS cladding and alloy 600	B
3	0.3	Flat	Alloy 600	B
4	0.3	Flat	Boundary between alloy 600 and 316L SS	B
5	0.3	Flat	316L SS	B

\* A; 20 % or more, B; less than 20 %

Table5 Test results of TP-2

EDM Slit No.	Depth (mm)	Surface figure	Material	Sensitivity*
1	0.3	Flat	Boundary between 316L SS and alloy 690	B
2	0.5	Flat	Boundary between 316L SS and alloy 690	A
3	1.0	Flat	Boundary between 316L SS and alloy 690	A
4	0.3	Flat	Alloy 690	B
5	0.5	Flat	Alloy 690	A
6	1.0	Flat	Alloy 690	A

\* A; 20 % or more, B; less than 20 %

TP-1-1に付与したEDMスリットNo.7(深さ0.3mm、平面上に付与)のCスコープ表示をFig.6に示す。同図中のxy平面が試験体表面に対応しており、z軸がECTの探傷信号振幅を示す軸である。この結果から、EDMスリットが明確に検出できていることがわかる。また、各試験体に付与した深さ0.3mmのEDMスリットについても、Fig.6に示すCスコープ表示に準ずる結果を示した。

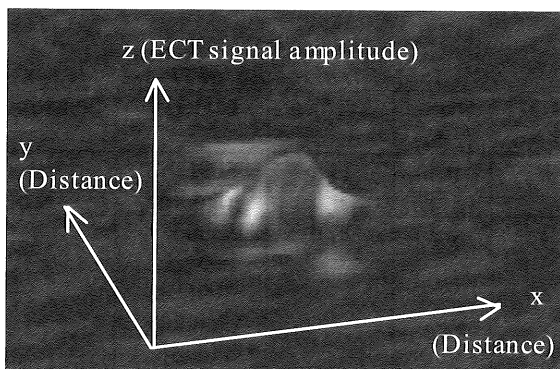


Fig.6 C scope image of EDM slit N0.7 on TP-1-1

以上の探傷試験結果から、水中レーザー溶接施工時の機械加工面(開先加工面およびレーザー溶接部表面、さらにそれら表面の異種金属境界)に対するECTの欠陥検出性として、深さ0.3mm以上のEDMスリットを検出できることを確認し、ECTが水中レーザー溶接向け表面検査へ適用可能であることを確認した。

## 5. 結言

水中レーザー溶接施工時に要求される表面検査を想定し、EDMスリットを付与した模擬試験体を用いてECT探傷試験を行い、検出性を評価した。

その結果、水中レーザー溶接施工時の機械加工面に対するECTの欠陥検出性として、深さ0.3mm以上のEDMスリットを検出できることを確認し、ECTが水中レーザー溶接向け表面検査へ適用可能であることを確認した。

## 参考文献

- [1] 福田健, 田村雅貴, 頓宮雄一, 河野渉, 小畑稔, 森島康雄, ”水中レーザーによるテンパービード溶接技術の開発”, 日本機械学会第15回動力・エネルギー技術シンポジウム, (2010) to be published.