

技術論文

PWR容器の異種金属溶接部 ECT 検査手法の開発

Development of Eddy Current Testing Method for PWR Vessel's Dissimilar Metal Weld

三菱重工業株式会社 神戸造船所
 三菱重工業株式会社 神戸造船所
 三菱重工業株式会社 神戸造船所
 三菱重工業株式会社 高砂研究所
 三菱重工業株式会社 高砂研究所
 関西電力株式会社 原子力事業本部
 関西電力株式会社 原子力事業本部

浅田 義浩
 徳久 貴一
 高次 正弥
 黒川 政秋
 川田 かよ子
 平野 伸朗
 濑良 健彦

Yoshihiro ASADA
 Kiichi TOKUHISA
 Masaya TAKATSUGU
 Masaaki KUROKAWA
 Kayoko KAWATA
 Shinro HIRANO
 Takehiko SERA

Eddy Current testing (ECT) for detecting stress corrosion cracks (SCCs) in the vessel's dissimilar metal weld of PWR plants was carried out. Appropriate ECT with a single cross-coil can detect shallow artificial SCCs with depth of 0.5mm or over. And magnetic saturation method is very effective for decreasing noise signals come from permeability change in the boundary region between overlay and buttering of safe-end.

Keywords: ECT testing, Nickel-Alloy steel welding, Dissimilar metal weld, SCC, PWR, RV, SG

1. 緒言

近年、加圧水型原子力発電プラント(以下、PWR)のニッケルクロム鉄合金(以下、600系合金)溶接部からの応力腐食割れ(以下、SCC)損傷事例が国内外において発生しており^[1]、異種金属溶接部を対象とした検査技術の研究が精力的に進められている^[2]。

圧力容器や蒸気発生器の出入口管台などの大口径異種金属溶接部は、内面アクセスが可能なため欠陥開口面側からの検出性が高い渦流探傷検査(ECT)の適用が検討されている。ECT検出性について、これまで種々の研究が実施されているが^{[3][4][5]}、600系合金特有の透磁率変化によるノイズ影響下での試験データは少ないため、当該部を対象としたECT検出性に関するデータベース蓄積が望まれている。そこで、本研究では圧力容器や蒸気発生器の出入口管台の異種金属溶接部を模擬した平板試験体を製作し、試験体に模擬SCCを付与

した後に、ECT探傷を行って当該部位でのSCC検出性を評価した。また、容器管台の異種金属溶接部を模擬した試験体を製作し、EDMスリットを付与した後にECT探傷を行って、透磁率変化によるノイズが発生する場合の欠陥検出性も評価した。

2. ECT探傷試験

2.1 試験体の製作及び試験手順

製作したSCC付与平板試験体の主な仕様を表2-1に示す。平板試験体はSUS316の平板に600系合金相当の溶材を部分的に溶接して製作した。

始めに平板試験体の溶接部に放電加工によりスタートノッチを付与し、次いでポリチオノ酸液中で4点曲げにより応力を附加してSCCを溶接金属中に挿入した。目視やPT等でSCC付与を確認後に、表面を切削してスタートノッチを除去して探傷面を平滑にした。試験体形状とSCC付与位置を図2-1に、完成したSCCの外観(PT写真)例を図2-2に示す。

表2-1 平板試験体の仕様

欠陥仕様	目標深さ mm	付与部位	体数	個数
SCC	0.5~数 mm	600系溶金部	5	15

◆連絡先: 黒川 政秋

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1
 三菱重工業株式会社 技術本部高砂研究所
 電子・光技術研究室
 E-mail: masaaki_kurokawa@mhi.co.jp

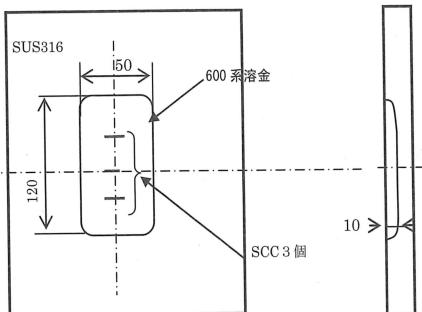


図 2-1 平板試験体

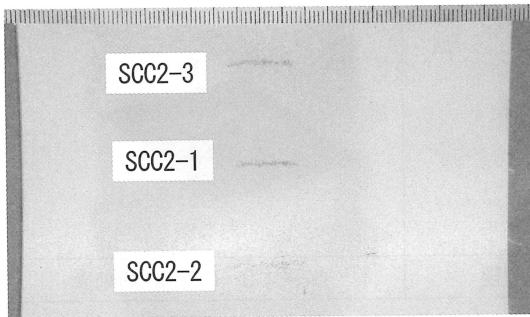


図 2-2 完成した SCC 試験体（試験体 2）の外観

ECT 探傷試験では、試験体表面を段階的に切削加工して、その都度、同一プローブによる探傷を実施した。探傷試験終了後に破壊調査を行って深さを求めた。探傷時の SCC 深さも破壊調査時の SCC 深さから求めた。

なお、平板試験体は合計 5 体、試験体 1 体当たり 3 個の SCC を付与したため合計 15 個の SCC を製作した。

2.2 SCC 検出試験

ECT 探傷試験要領の概略を表 2-2 に示す。ECT 探傷試験では、外径約 3mm の自己誘導・自己比較方式のクロスコイルを用いたプローブを使用し、コイルと被検体表面とのリフトオフはすべての試験で一定の約 0.5mm とした。

表 2-2 ECT 探傷要領の概要

項目	仕様
プローブ	単一クロスコイル（外径約3mm）を用いたプローブ
探傷面	欠陥の開口面から探傷
探傷周波数	50kHz, 100kHz, 200kHz, 400kHz
校正	1mm 深さスリットを全振幅3V、位相角-15度に設定

コイルの感度・位相調整は、使用したコイル径に比較して十分に長い深さ 1mm の放電加工スリット (EDM スリット) の信号を全振幅 3V、位相角-15 度に設定した。

また、各試験体の表面切削量は、検出した SCC 信号レベルを参考にして、SCC 深さで 0.5mm~5mm 程度の探傷データ蓄積を目標として決定した。各試験体に対し 1~3 回程度の表面切削加工を行い、その都度 ECT 探傷を行った。

データ採取は、軸方向 1mm ピッチ、周方向 0.5mm ピッチとした。また、探傷では、50, 100, 200, 400kHz の 4 周波数を使用したが、検出性に関しては各周波数で有意な差は見られなかったため代表として 400kHz の探傷結果を図 2-3 に示す。

周波数 400kHz の信号振幅と位相角をまとめて表 2-3 に示す。予想される様に表面切削を行うことで信号振幅は単調に減少した。欠陥はすべて開口しているため、位相角変化は小さかった。また、製作したすべての平板試験体で、SUS316 と 600 系溶金境界に欠陥検出に障害となるノイズは観察されなかった。

表 2-3 表面切削後の ECT 探傷試験結果（周波数 400kHz）

欠陥番号	表面削除量 mm								
	0	0.5	0.7	1.0	1.5	1.8	2.0	3.0	3.2
1-1	電圧、V	1.8	—	—	—	—	—	—	—
	位相角、度	155	—	—	—	—	—	—	—
1-2	電圧、V	2.8	—	—	—	—	0.55	—	—
	位相角、度	154	—	—	—	—	153	—	—
1-3	電圧、V	2.5	—	—	—	—	0.61	—	—
	位相角、度	162	—	—	—	—	164	—	—
2-1	電圧、V	3.1	2.2	2.3	—	—	—	—	—
	位相角、度	152	148	148	—	—	—	—	—
2-2	電圧、V	2.7	2.5	2.3	—	—	—	—	—
	位相角、度	153	157	157	—	—	—	—	—
2-3	電圧、V	2.5	1.9	1.8	—	—	—	—	—
	位相角、度	151	153	149	—	—	—	—	—
3-1	電圧、V	2.0	1.1	0.74	—	—	—	—	—
	位相角、度	153	162	162	—	—	—	—	—
3-2	電圧、V	2.2	1.8	1.4	—	—	—	—	—
	位相角、度	162	156	161	—	—	—	—	—
3-3	電圧、V	3.0	1.9	1.8	—	—	—	—	—
	位相角、度	152	159	154	—	—	—	—	—
4-1	電圧、V	3.3	—	—	—	—	2.0	0.9	0.4
	位相角、度	148	—	—	—	—	157	170	178
4-2	電圧、V	3.3	—	—	—	—	1.9	0.7	0.2
	位相角、度	151	—	—	—	—	153	169	166
4-3	電圧、V	3.4	—	—	—	—	1.6	0.5	—
	位相角、度	150	—	—	—	—	155	164	—
5-1	電圧、V	4.0	4.4	—	3.8	3.6	—	—	—
	位相角、度	153	152	—	150	152	—	—	—
5-2	電圧、V	3.1	3.5	—	3.4	3.2	—	—	—
	位相角、度	149	143	—	147	145	—	—	—
5-3	電圧、V	4.5	4.5	—	4.4	4.1	—	—	—
	位相角、度	149	149	—	149	149	—	—	—

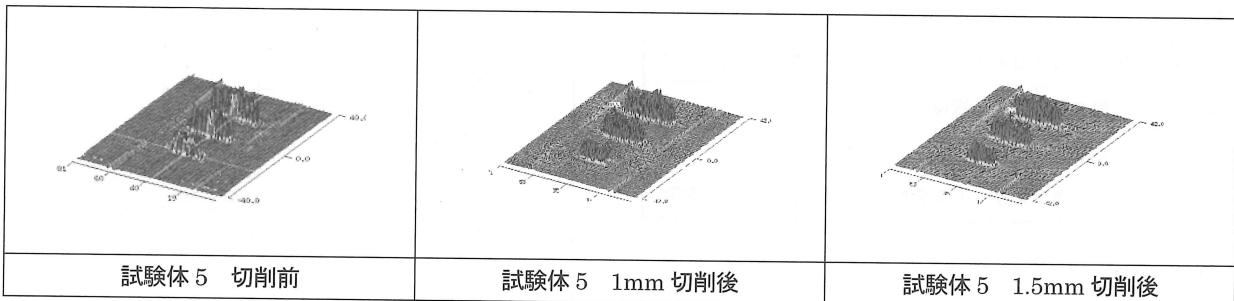
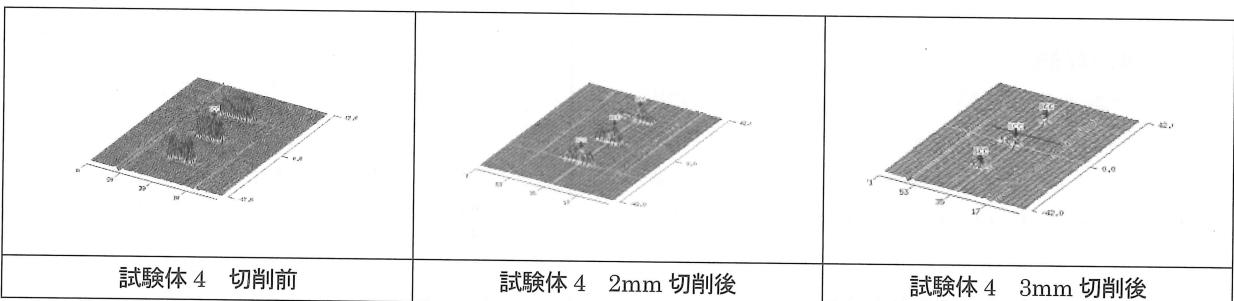
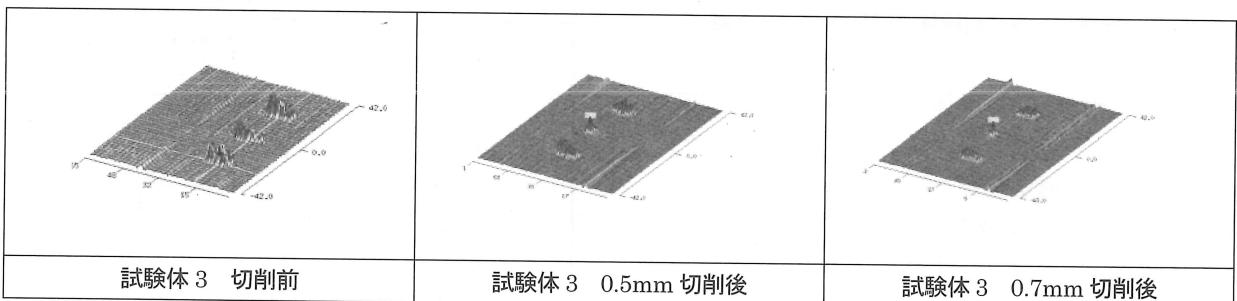
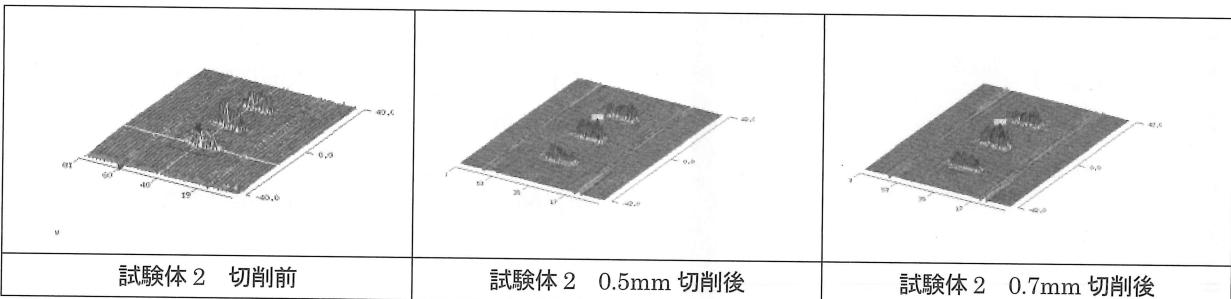
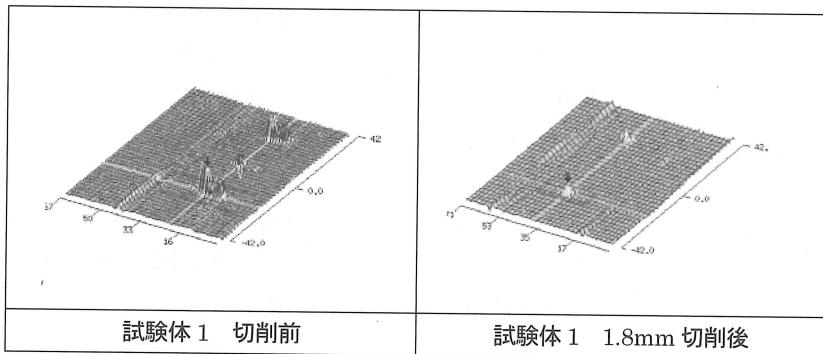


図 2-3 探傷波形 (C スコープ, 400kHz)

表 2-4 曲率の影響確認結果

EDM スリット	試験体	平板		管台模擬	
		長さ	深さ	長さ	深さ
	長さ	3mm	3mm	3mm	3mm
	深さ	1mm	2mm	1mm	2mm
電圧, V		3.5	4.5	3.6	4.7
位相角, 度		158	152	158	152
探傷データ (400kHz)					

SCC1-1 は 1.8mm 切削時に消失したため、深さを求めることができなかつたが、それ以外の 14 個の SCC は最終の表面切削後もすべて検出可能であった。

なお、平板と管台形状で、欠陥信号に有意な差がないことは、表 2-4 に示すように EDM スリット試験体を用いて確認した。

2.3 磁気飽和型 ECT

本研究で製作した平板 SCC 試験体では透磁率変化に起因する境界ノイズは観察されなかつたが、実機モックアップ形状の試験体では境界部ノイズが観察された。

図 2-4 に試験で使用した圧力容器出口管台形状の異種金属溶接部模擬試験体の仕様を示す。試験体には、多数の周方向 EDM スリットが付与されている。通常 ECT プローブと永久磁石により磁気飽和した ECT プローブでの探傷結果を図 2-5 に示す。

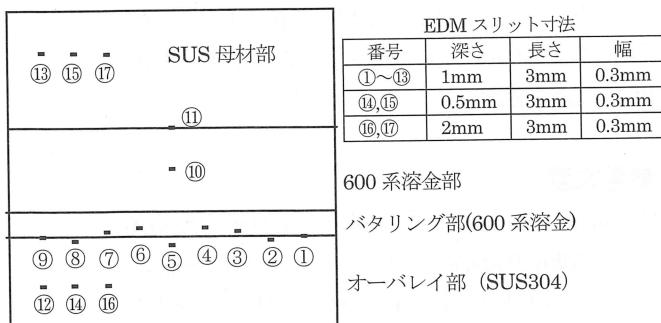


図 2-4 異種金属溶接部模擬試験体

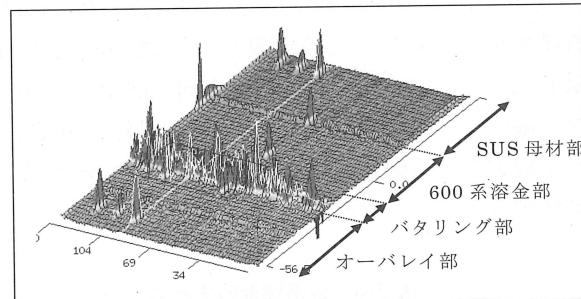
通常 ECT プローブによる探傷では、オーバレイ部とバタリング境界部で透磁率変化に伴うノイズが発生するため、この部分での欠陥検出性が低下していること

が確認できる。

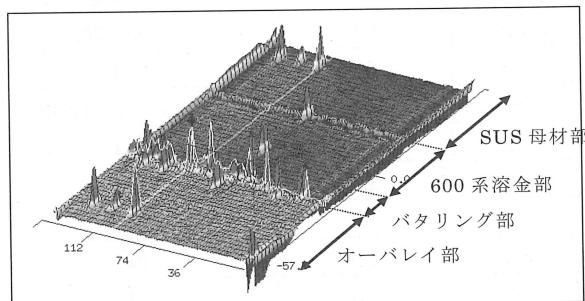
一方、磁気飽和型 ECT ではこのノイズが大幅に低減していることが確認できる。磁気飽和型の場合に印可しているコイル近傍での磁束密度は約 1500 ガウス程度であり、磁石の探傷面への吸着によるプローブ走査障害等は発生しないレベルであった。

以上の様に、磁気飽和によりオーバレイとバタリング境界部で発生するノイズレベルを大幅に低減できることが確認できた。また、磁気飽和によりこのノイズ信号が低減されることから、この部位のノイズ発生原因が透磁率変化に起因することの確認もできたと言える。

次に、磁気飽和が欠陥信号に有意な影響を与えないことを確認するために、磁気飽和を行った状態で、SCC 検出試験で使用した平板 SCC 試験体の探傷試験も実施した。磁気飽和の有無による信号電圧と位相角の比較を表 2-5 に示す。予想通り、磁気飽和の有無で信号電圧と位相角に有意差が無く、磁気飽和が欠陥検出に影響を与えないことが確認できた。



通常 ECT



磁気飽和型 ECT

図 2-5 通常 ECT と磁気飽和型 ECT の比較

表 2-5 磁気飽和の有無による信号の比較（周波数 400kHz）

欠陥番号	磁気飽和無し		磁気飽和有り		比較	
	電圧 V	位相角度	電圧 V	位相角度	電圧比 %	位相角差度
2-1	3.1	152	3.2	155	96	-3
2-2	2.7	153	2.9	162	96	-9
2-3	2.5	151	2.5	149	98	2
3-1	2.0	153	2.0	157	99	-4
3-2	2.2	162	2.2	160	100	2
3-3	3.0	152	2.7	153	112	-1
4-1	3.3	148	3.2	147	104	1
4-2	3.3	151	3.2	155	105	-4
4-3	3.4	150	3.5	152	97	-2
5-1	4.0	153	4.0	151	99	2
5-2	3.1	149	3.3	147	94	2
5-3	4.5	149	4.5	149	99	0

2.4 破壊調査

表面切削後の比較的浅い SCC の PT 写真及び破壊調査結果を図 2-6 に示す。破壊調査では、深い SCC の内、SCC1-2 と SCC1-3 は、欠陥直交方向に切断して断面ミクロ観察で欠陥深さを測定した。それ以外の SCC はすべて疲労による破面開放を行って欠陥深さを測定した。破壊調査のまとめを表 2-6 に示す。

表 2-6 破壊調査のまとめ

欠陥番号	破壊結果mm	備考
1-1	-	1.8mm切削後消失
1-2	0.6	1.8mm切削
1-3	0.5	同上
2-1	3.2	0.5mm、0.7mm切削
2-2	2.6	同上
2-3	2.7	同上
3-1	1.3	同上
3-2	1.9	同上
3-3	1.8	同上
4-1	0.5	2mm、3mm、3.2mm切削
4-2	0.5	同上
4-3	0.6	2mm、3mm切削
5-1	5.0	0.5mm、1.0mm、1.5mm切削
5-2	4.9	同上
5-3	5.0	同上

3. 試験結果の評価

SCC 欠陥深さと ECT 検出信号電圧の関係を図 3-1 に示す。破壊調査結果から、クロスコイル型 ECT プローブは、平板試験体で深さ 0.5mm～1mm 程度の SCC の検出が可能であった。また、検出信号レベルは深さ 5mm 程度まで欠陥深さにほぼ比例する傾向を示した。

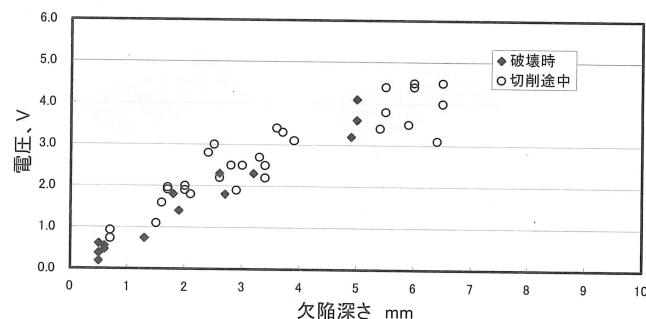


図 3-1 欠陥深さと ECT 検出信号の関係

4. まとめ

ECT 検出性能に関し、下記の知見が得られた。

- ① クロスコイル型 ECT プローブを用いて平板 SCC 試験体を探傷した結果、深さ 0.5mm～1mm 程度の SCC を検出できた。検出信号レベルは深さ 5mm 程度まで欠陥深さにほぼ比例する傾向を示した。
- ② 磁気飽和により、オーバレイとバタリング境界部に発生する透磁率変化に起因するノイズを大幅に低減することが可能である。また、磁気飽和は、SCC 検出信号の振幅・位相に影響を与えない。

謝辞

本研究を行うに当たり、PWR 電力各社からデータ開示を含む種々のご協力をいただきました。関係者の御協力に深く感謝いたします。

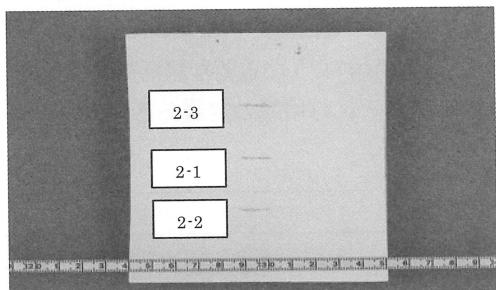
参考文献

- [1] 高原、渡辺、“米国の加圧水型原子力発電所における Alloy 600 製圧力バウンダリー構成機器の 1 次冷却水応力腐食割れ事例の傾向分析”、日本原子力学会論文誌、Vol.5-No.4、pp282-291、2006.
- [2] 原子力安全基盤機構、“平成 17 年度ニッケル基合金溶接部の報告書”、2006.
- [3] 櫻井、黄、高木、内一、“数値シミュレーション支援によるアレイマルチコイル型渦電流探傷プローブの開発”、日本機械学会論文集(A)、Vol.68-No676、

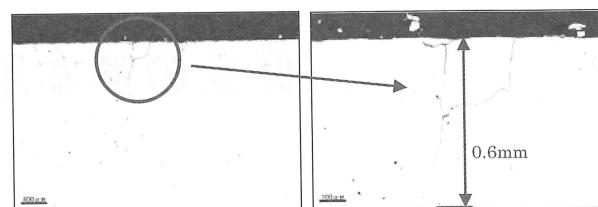
pp1801-1808、2002.

- [4] 大島、橋本、“渦電流探傷試験における SCC の数値解析モデル化の検討”、日本 AEM 学会誌、Vol.10-No.4、pp348-388、2002.
 [5] 長屋、高木、黄、内一、“テンプレートマッチングを用いた画像処理による渦電流探傷信号からの複数欠陥の同定”、日本機械学会論文集(A)、Vol.69-No.684、pp60-67、2003.

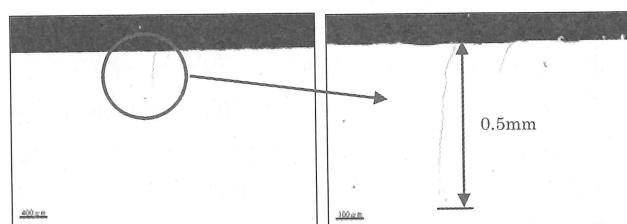
(平成 19 年 7 月 30 日)



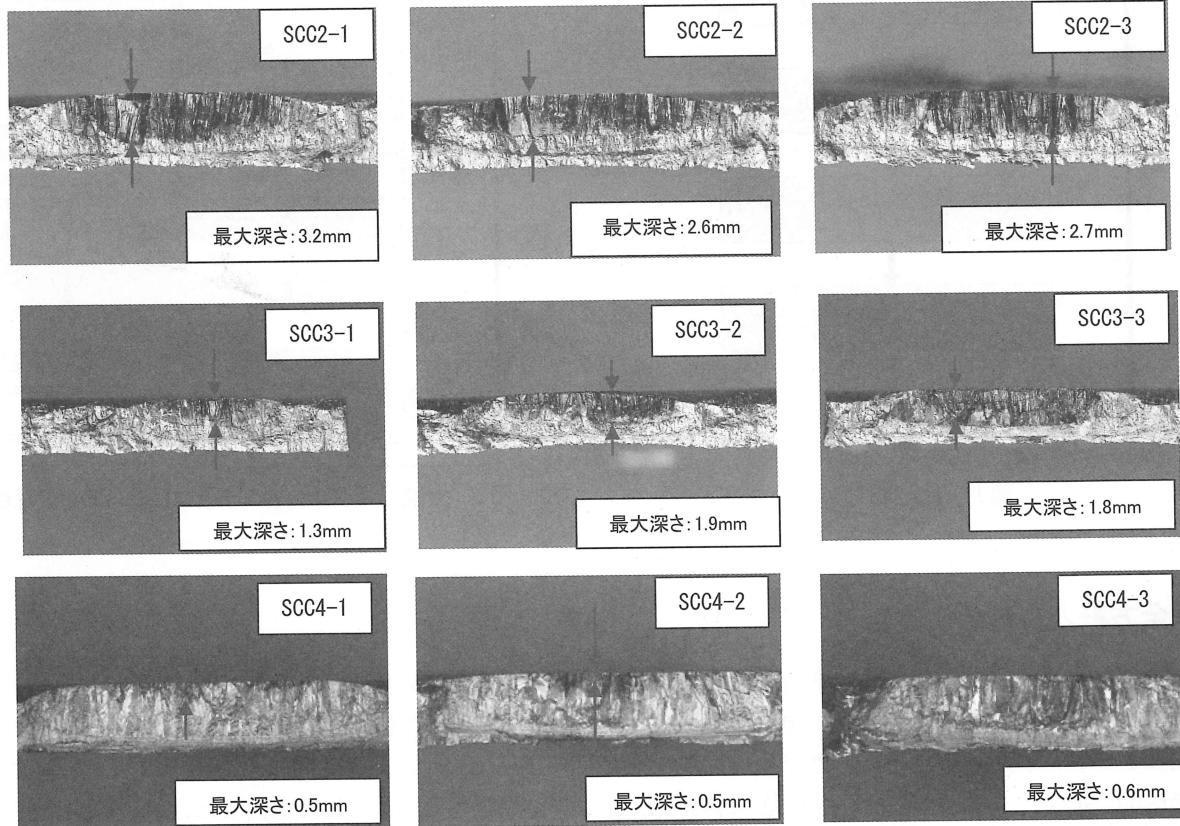
試験体 2 の外観及び PT 検査状況



SCC1-2 の断面ミクロ



SCC1-3 の断面ミクロ



試験体 2~4 の外観及び PT 検査状況

図 2-6 破壊調査結果