

給水ノズルコーナー部への渦電流探傷試験適用に対する確認項目と結果について

## 1. 経緯

給水ノズルコーナー部の特別点検は、磁粉探傷試験若しくは浸透探傷試験又は渦電流探傷試験（以下「ECT」という。）による点検が要求されており、当該部位の設置位置や水中環境下であることを考慮してECTを選択した。

ECTに関する指針として JEAG4217-2010 が制定されているが、本指針は原子力安全基盤機構（JNES）の原子力用機器材料の非破壊検査技術実証事業である「低炭素ステンレス鋼溶接部の非破壊検査技術実証（NSA）」、「ニッケル基合金溶接部の非破壊検査技術実証（NNW）」などの試験で得られた知見をベースに指針化されており、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金（非磁性体）の母材部及び溶接部を対象としてECTの試験要領を規定している。

一方、給水ノズルコーナー部は低合金鋼（磁性体）であり、一般的には磁性体は磁気的特性のバラつきが大きく、非磁性体の場合と比較すると磁気ノイズによりSN比が低下し亀裂の検出が困難となることが知られている。

上記背景から、給水ノズルコーナー部におけるECTの欠陥検出性を確認するために、実機と同材質（2013年度は同等品）の試験体を用いて以下に示す実機適用試験を実施した。また、実機適用試験の成果を踏まえ、試験要領及び欠陥判定方法を確立した。

- (1) 2013年度 基礎試験
- (2) 2014年度 実機適用試験

## 2. 試験内容

## (1) 2013年度 基礎試験

基礎試験として、JEAG4217に記載の試験要領にて磁性体に付与したEDMノッチの検出可否を確認した。確認項目と結果を以下に示す。確認項目と結果を表1に示し、試験要領を表2に示す。

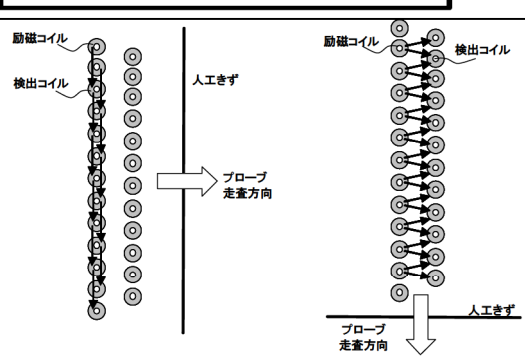
表1 2013年度 基礎試験 確認項目と結果

No.	確認項目	試験体形状	材質	付与欠陥	確認方法	結果
1	材料の影響確認 (磁性体へのECT適用可否)	・平板形状	SFVQ1A※	・EDM ノッチ	平板形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	欠陥信号が得られることを確認 (表5)
2	曲率形状の影響 (平面/曲面の違い)	・2次元 R形状	SFVQ1A※	・EDM ノッチ	曲面形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	形状による欠陥検出性への影響がないことを確認 (表6)

※：材料の入手性から、SFVQ1Aを選択

本資料のうち、枠囲みの範囲は、営業秘密  
又は防護上の観点から公開できません。

表2 2013年度 基礎試験 試験要領

項目		試験要領	
使用 機材	プローブ	試験コイル型式と方式	相互誘導形標準比較方式 (パンケーキコイル)
		コイル外径	<input type="text"/> mm
		検出コイルの間隔	<input type="text"/> mm
	対比試験片	形状	平面
		材料	SFVQ1A
		人工きずの寸法	深さ : 1 ± 0.1 mm 幅 : 0.3 ± 0.05 mm 長さ : 18 mm
試験 要領	基準感度及び位相角の設定(キャリブレーション)	対比試験片の人工きずの信号を以下に設定する  <input type="text"/>	
	JEAG-4217-2010「原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針」に記載の要領で実施	 <p>V 検出モード H 検出モード キャリブレーションのプローブ走査方法</p>	
試験周波数		<input type="text"/>	
走査条件	プローブの走査方向	スリットの長さ方向に対し直交方向	
	プローブの走査速度	<input type="text"/> ただし、データを再現よく採取可能な速度とする	
	コイルの並び方向	スリットの長さ方向に対し平行方向	

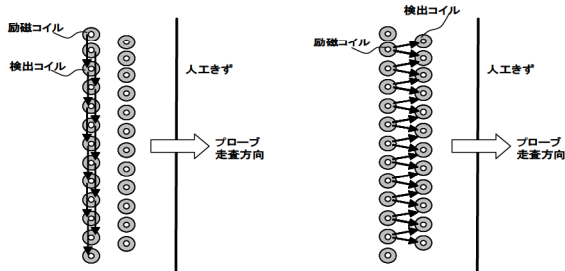
(2) 2014年度 実機適用試験

前項(1)の基礎試験結果を受けて、実機適用のために必要な確認項目について試験を実施した。確認項目と結果を表3に示し、試験要領を表4に示す。

表3 2014年度 実機適用試験 確認項目と結果

No.	確認項目	試験体形状	材質	付与欠陥	確認方法	結果
1	材料の影響確認 (実機同材質での確認)	・平板形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ	平板形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	欠陥信号が得られることを確認 (表7)
2	材料の影響確認 (EDMノッチと疲労亀裂の違い)	・平板形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ ・機械疲労亀裂	平板形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	機械疲労亀裂についても検出可能を確認 (表8)
3	曲率形状の影響 (実機同材質での平面/曲面の違い)	・平板形状 ・2次元R形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ	平板形状試験体及び2次元R形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	形状による欠陥検出性の影響がないことを確認 (表7)
4	曲率形状の影響 (EDMノッチと疲労亀裂の違い)	・2次元R形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ ・機械疲労亀裂	2次元R形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	機械疲労亀裂についても検出可能を確認 (表9)
5	曲率形状の影響 (3次元形状の影響)	・3次元形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ	3次元形状試験体での欠陥信号検出の可否確認	実機形状においても欠陥信号が検出可能を確認 (表10)
6	他の影響因子の影響 ・磁気ノイズ	・平板形状	SA-508 CL. 2	—	SUS材とのノイズ信号の比較	磁気ノイズの影響がないことを確認 (表11)
7	他の影響因子の影響 ・酸化被膜	・2次元R形状	SA-508 CL. 2	・機械疲労亀裂	酸化被膜の有無による欠陥信号検出の影響確認	酸化被膜の有無による影響は少ないことを確認 (表12)
8	他の影響因子の影響 ・リフトオフ	・平板形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ	リフトオフ量とノイズ信号の関係確認	リフトオフ量 <input type="text" value=""/> mm までは影響なし (表13)
9	他の影響因子の影響 ・金属クラッド	・平板形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ ・機械疲労亀裂	金属クラッドによる欠陥信号検出の影響確認	金属クラッドの影響は小さいことを確認 (表14)
10	他の影響因子の影響 ・着磁ノイズ	・平板形状	SA-508 CL. 2	・EDM ノッチ	ノイズ影響下での欠陥信号検出の可否確認	欠陥信号の着磁ノイズ信号の識別可能を確認 (表15)

表4 2014年度 実機適用試験 試験要領

項目		試験要領	
使用 機材	プローブ	試験コイル型式と方式	相互誘導形標準比較方式 (パンケーキコイル)
		コイル外径	<input type="text"/> mm
		検出コイルの間隔	<input type="text"/> mm
	対比試験片	形状	平板
		材料	ASME SA508 Class2
		人工きずの寸法	深さ : $1 \pm 0.1$ mm 幅 : $0.3 \pm 0.05$ mm 長さ : 基準感度及び位相角の設定が再現良く測定できる長さ
試験 要領	基準感度及び位相角の設定 (キャリブレーション)	対比試験片の人工きずの信号を以下に設定する <input type="text"/>	
		 <p>V検出モード H検出モード キャリブレーションのプローブ走査方法</p>	
	試験周波数	<input type="text"/>	
走査 条件	プローブ の走査 方向	平板形状試験体	欠陥に対して平行/直交/斜め 45° 方向
		2次元 R 形状 試験体	ノズル円周方向
		実機模擬 3次元形状試験体	
		プローブの走査速度	<input type="text"/> ただし、データを再現よく採取可能な速度とする
	コイルの 並び方向	平板形状試験体	欠陥に対して平行/直交/斜め 45° 方向
		2次元 R 形状 試験体	ノズル軸方向
実機模擬 3次元形状試験体			

### 3. 試験結果

#### 3. 1 2013 年度 基礎試験

基礎試験として、JEAG4217 に記載の試験要領にて磁性体に付与した EDM ノッチの検出可否の確認を実施した。以下に試験結果を示す。

##### a. 材料の影響確認

磁性体への ECT 適用可否を確認するために、JEAG4217 に記載の試験要領にて平板形状試験体に付与した EDM ノッチの検出可否を確認した。

上記試験結果から、磁性体の平板形状試験体において非磁性体と同等の試験要領で欠陥信号を得られることを確認した。

表 5 材料の影響確認試験結果 (EDM ノッチ 深さ 1 mm)

試験周波数	
検出モード	V 検出モード
	H 検出モード

b. 曲率形状の影響

曲面部探傷時の影響確認のため、2次元R形状部に付与したEDMノッチの検出可否を確認した。

上記試験結果から、平板形状試験体と2次元R形状試験体のECT信号振幅値は同程度であり、被検体の形状による欠陥検出性への影響がないことを確認した。

表6 曲率形状の影響確認試験結果 (EDMノッチ 深さ1 mm)

試験周波数	
検出モード	V検出モード
	H検出モード

3. 2 2014 年度 実機適用試験

2014 年度は、実機と同材質の SA-508 CL. 2 にて試験体を製作し、欠陥検出性及び ECT 特性について試験を実施した。以下に試験結果を示す。

(1) 欠陥検出性評価結果

a. 被検体形状による欠陥検出性への影響評価

EDM ノッチを付与した平板形状試験体と 2 次元 R 形状試験体の ECT 信号振幅値は同程度であり、被検体の形状による欠陥検出性への影響がないことを確認した。

表 7 試験体形状による ECT 信号への影響確認結果 (EDM ノッチ 深さ 1 mm)

試験体形状		試験周波数
検出モード	V 検出モード	

試験体形状		平板形状試験体	2次元 R 形状試験体
試験周波数			
検出モード	H検出モード		



b. 機械疲労亀裂に対する欠陥検出性評価

平板形状試験体及び2次元R形状試験体における機械疲労亀裂からのECT信号振幅値は、EDMノッチからの振幅値と同等の振幅値を得られており、実機に発生する欠陥性状により近い機械疲労亀裂についても検出が可能であることを確認した。

表8 平板形状試験体による欠陥性状の影響確認試験結果

欠陥性状		EDM ノッチ 深さ 1 mm	機械疲労亀裂 深さ 1 mm
試験 周波数			
検出モード	V 検出モード		

欠陥性状	EDM ノッチ 深さ 1 mm	機械疲労亀裂 深さ 1 mm
試験 周波数		
検出モード		
H 検出モード		

表 9 2次元R形状試験体による欠陥性状の影響確認試験結果

欠陥性状	EDM ノッチ 深さ 1 mm	機械疲労亀裂 深さ 1 mm
試験 周波数		
検出モード		

欠陥性状	EDM ノッチ 深さ 1 mm	機械疲労亀裂 深さ 1 mm
試験 周波数		
検出モード		
H 検出モード		

c. 実機給水ノズル形状試験体における欠陥検出性の確認結果

実機給水ノズル形状試験体において、ノズルコーナー部に付与した深さ 1 mm の EDM ノッチの信号を検出出来た。実機 3 次元形状においても欠陥信号を検出可能であることを確認した。

表 10 3次元実機形状模擬試験体の検出性確認試験結果

欠陥性状		EDM ノッチ 深さ 1 mm
試験周波数		
検出モード	V 検出モード	
	H 検出モード	

※C スコープ画像の横軸は×0.1° にて表示

(2) 磁性体における ECT 特性把握及び適用性評価結果

a. 磁性体における磁気ノイズの影響

磁性体と非磁性体(ステンレス鋼材)のノイズ信号レベルを比較し、磁性体の磁気ノイズの影響を確認した。磁性体のノイズ信号は、非磁性体のノイズ信号より高いことが確認できるが、その差は  程度であり、基準感度の振幅値に比べて非常に低い数値であることから、磁気ノイズの影響のないことを確認した。

表 11 磁性体と非磁性体におけるノイズ信号の比較

試験 周波数	
検出モード	V 検出 モード
	H 検出 モード

b. 酸化被膜の影響

深さ 1 mm の機械疲労亀裂が付与された 2 次元 R 形状試験体をオートクレーブ装置中に設置し、高温水中浸漬による酸化被膜付与処理を行い、試験体表面に酸化被膜を形成した。

酸化被膜の影響を確認するため、酸化被膜形成後に試験を実施し、その後試験体表面を深さ 0.1 mm 研削して酸化被膜を除去した後、再度試験を行った。

酸化被膜除去後の機械疲労亀裂の検出信号は、酸化被膜がある場合と比較し低下する傾向がみられたが、検出信号が変化した要因として、表面を研削したことによる機械疲労亀裂の深さの変化によるものが支配的であると考えられる。

平板形状試験体での EDM ノッチ深さと検出信号の関係から、V 検出モードの  kHz の場合、ノッチ深さ 1 mm とノッチ深さ 0.5 mm では、検出信号が  V 程度の差となっており、ノッチ深さ 0.1 mm の差に対する検出信号の変化は、 V 程度であると推定される。

検出信号は亀裂深さの変化が大きく影響すると考えられ、酸化被膜の有無による検出信号に与える影響は少ないと考える。

表 12 酸化被膜の影響確認試験結果

試験 周波数		V 検出 モード
検出 モード	V 検出 モード	

c. 試験体表面とプローブ間のリフトオフの影響

プローブのリフトオフ量を試験体表面から離れる方向に変化させたときの EDM ノッチに対する検出性は、周波数  kHz 及び  kHz において、リフトオフ量  mm までは検出信号はノイズ信号レベルを超えていることを確認し、リフトオフ量が欠陥検出性に影響を与えない範囲を確認した。

表 13 リフトオフ量の影響確認試験結果

試験 周波数		検出モード	V 検出モード

この結果を踏まえ、実機の探傷においては試験部の表面にプローブを設置する際、リフトオフ量が  mm 以内となることを確保するための以下の管理項目を設定した。

- (1) X 振幅の変曲点を通すること。
- (2) X 振幅の変曲点から  V 以上の信号が発生していること。

図 1 に例として周波数  kHz の V 検出モードの X 振幅チャートを示す。

図 2 に X 振幅チャート上の各点におけるプローブのリフトオフ量の関係を示す。



図 1 周波数  kHz の V 検出モードの X 振幅チャート

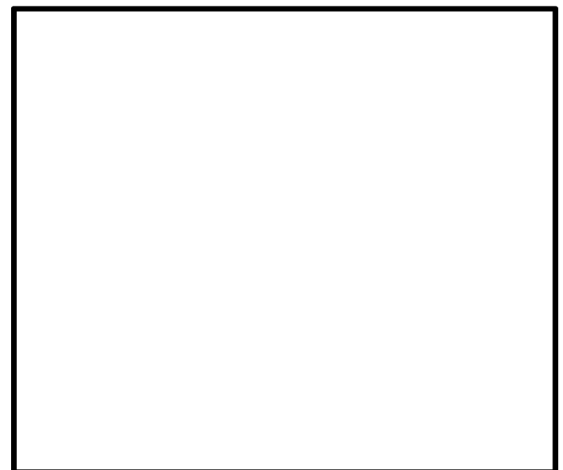


図 2 X 振幅チャート上の各点におけるプローブのリフトオフ量の関係



d. 金属クラッド(ソフトクラッド)の影響

炉内で発生するクラッドの成分のうち、磁性をもつマグネタイト(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)の粉末を用いて金属クラッドの影響の確認試験を実施した。EDM ノッチが付与された平板形状試験体と目標深さ 2 mm の機械疲労亀裂が付与された平板形状試験体を水中に沈め、各試験体表面に磁性粉末を堆積させ、その堆積厚さと検出信号との関係性を評価した。

試験の結果、堆積厚さによらず同程度の振幅値が得られたことから、金属クラッドが欠陥検出性に及ぼす影響は無視できるほど小さいと考える。

表 14 金属クラッドの影響確認試験結果

試験 周波数		V 検出モード
検出モード		

e. 着磁ノイズの影響

マグネット等により試験体が着磁されたときの着磁ノイズ信号が欠陥検出信号に与える影響を確認した。試験結果のCスコープ画像から、使用したマグネットの形状が着磁ノイズ信号として確認できた。また、リサージュ波形から着磁ノイズ信号の位相角にV検出モードとH検出モードで約  の位相差があることが確認できた。この位相差により EDM ノッチの検出信号と着磁ノイズが重畳しても欠陥と判断できることを確認した。

以上のことから、Cスコープによるノイズ信号の分布とリサージュ波形によるV検出モードとH検出モードの位相差より、欠陥信号と着磁ノイズ信号の識別が可能であることを確認した。

表 15 着磁ノイズの影響確認試験結果

欠陥性状		EDM ノッチ 深さ 1mm
試験 周波数		
検出モード	V 検出 モード	
	H 検出 モード	

#### 4. 試験要領

実機適用試験の成果を踏まえ、実機点検時の試験要領を確立した。表 16 に試験要領を示す。

表 16 試験要領

項目		試験要領	備考	
使用 機材	プローブ	試験コイル型式と方式	相互誘導形標準比較方式 (パンケーキコイル)	・ JEAG4217-2010 (付属書 C)
		コイル外径	<input type="text"/> mm	・ 実機探傷前に実施した実機適用試験により決定
		検出コイルの間隔	<input type="text"/> mm	・ 実機探傷前に実施した実機適用試験により決定
	対 比 試 験 片	形状	平板, もしくは, 試験部の表面を模擬した形状	・ JEAG4217-2010 (2330 対比試験片)
		材料	ASME SA508 Class2	・ 実機と同材質
		人工きずの寸法	深さ : $1 \pm 0.1$ mm 幅 : $0.3 \pm 0.05$ mm 長さ : 基準感度及び位相角の設定が再現良く測定できる長さ	・ JEAG4217-2010 (2330 対比試験片)
試験要領	基準感度及び位相角の設定	対比試験片の人工きずの信号を以下に設定する  <input type="text"/>	・ JEAG4217-2010 (解説-C-2300-1) ・ 実機探傷前に実施した実機適用試験により決定	
	試験周波数	<input type="text"/>	・ JEAG4217-2010 (C-2400 試験周波数)	
走査条件	プローブの走査方向	ノズル円周方向	・ 実機探傷前に実施した実機適用試験により決定	
	プローブの走査速度	<input type="text"/> ただし, データを再現よく採取可能な速度とする	・ JEAG4217-2010 (2710 走査方法) ・ 実機探傷前に実施した実機適用試験により決定	
	コイルの並び方向	ノズル軸方向	・ 実機探傷前に実施した実機適用試験により決定	
	プローブの走査回数	2 回以上とする		

	接触条件	プローブ 設置		<ul style="list-style-type: none"> <li>・実機探傷前に実施した実機適用試験により決定</li> <li>・本資料 4. c を参照</li> </ul>
欠陥 検出	記録レベル		<input type="text"/> kHz と <input type="text"/> kHz とともに <input type="text"/> V とする	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実機探傷前に実施した実機適用試験により決定</li> </ul>
	欠陥判定		欠陥判定フローに従う	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JEAG4217-2010 (3200 欠陥判定)</li> <li>・実機探傷前に実施した実機適用試験により決定</li> <li>・本資料 5. を参照</li> </ul>

## 5. 欠陥判定方法

再現性のある試験結果において、記録レベルを超える指示部が欠陥によるものか否かを次の手順にて判定を行う。欠陥判定のフローを図 3 に示す。



### b. リサージ波形及び振幅チャートによる識別

あらかじめ試験によって求めたリサージ波形及び振幅チャートと欠陥の疑いのある指示部のリサージ波形及び振幅チャートをもとに、欠陥以外の信号と区別しながら識別する。

表 17 に欠陥信号と欠陥以外の信号例を示す。

### c. 指示模様による判定

b 項で欠陥によるものか否か識別できない場合は、C スコープの指示模様から、指示部周辺における検出信号の連続性、指示部の規則性の有無及び指示部の再現性を確認し、欠陥によるものか否か判定する。

### d. 欠陥によるものか否か判断できない場合

c 項で欠陥によるものか否か判断できない場合は、原則として欠陥とみなす。

表 17 欠陥信号と欠陥信号以外の信号例

信号の種類	振盪チャート		Cスコープ表示		リサーチユ波形	
	V電圧の波形	特徴	Cスコープ表示値	特徴	V検出モード	H検出モード
欠陥信号						
リフトオフ						
(コイル押き)						
表面うねり						
(グラインダー溝、凹 凸、肌荒れ等)						
形状信号						
(ドリフト、 形状変化)						
電磁氣的信号						
欠陥以外 の信号						

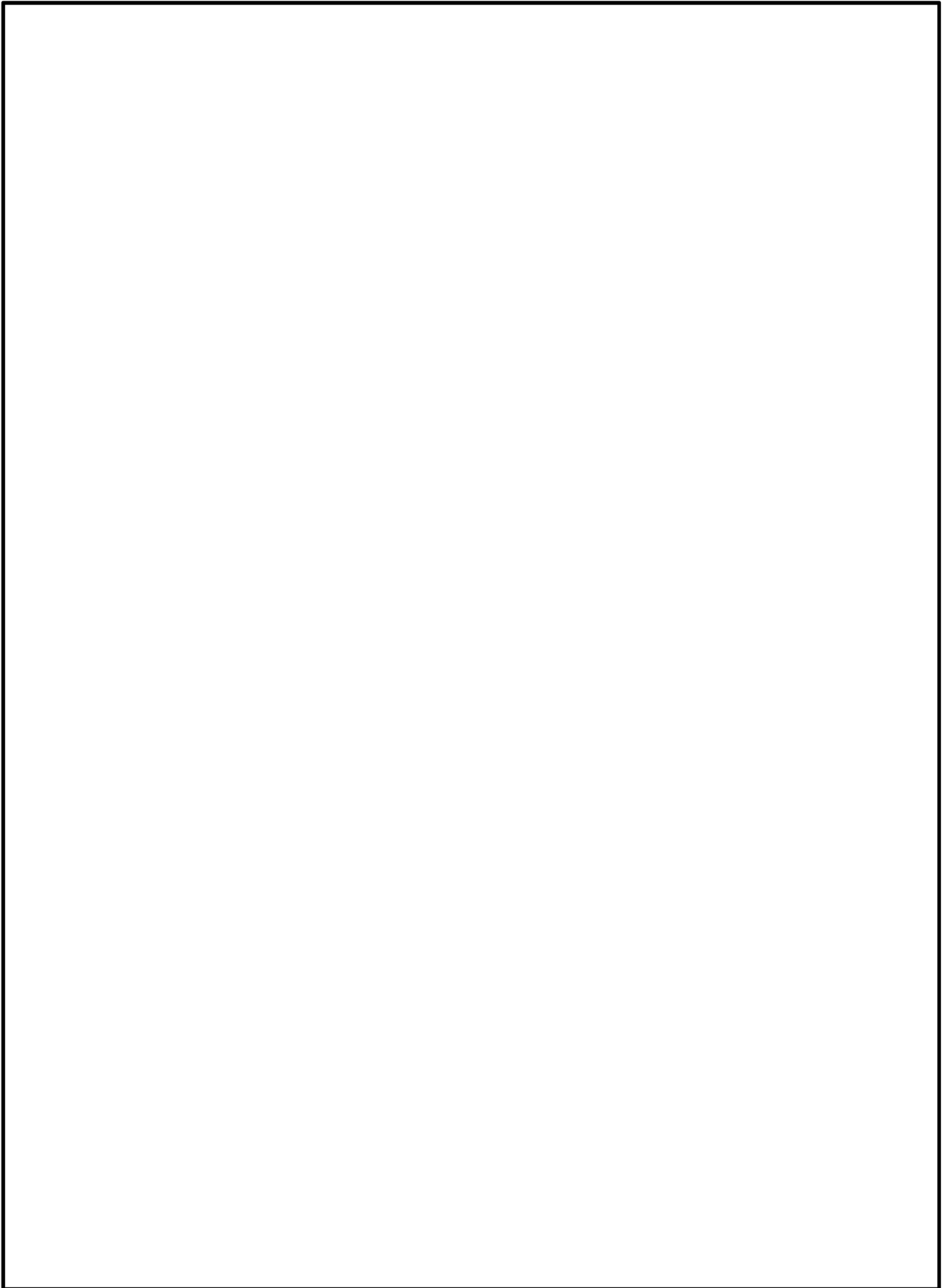


図 3 欠陥判定フロー

## 6. 結論

東海第二発電所の給水ノズルコーナー部（磁性体）に対する ECT の欠陥検出性を，実機と同材質の試験体を用いた試験により確認しており，表面に開口する 1 mm 程度の疲労亀裂を十分検出できることから，特別点検において適用した点検方法は，給水ノズルコーナー部の状態を確認する上で十分な欠陥検出性を有している。