

「渦電流探傷試験、超音波探傷試験及び漏えい率試験に係る
日本電気協会の規格の技術評価に関する検討チーム 第2回会合における
日本電気協会への説明依頼事項」に対する回答(JEAG4217-2018)

令和2年11月17日
(一社)日本電気協会
原子力規格委員会

標記につきましては、以下の通り回答いたします。

○説明依頼事項

1. JEAG4217-2018「原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針」に関する
説明依頼質問

- (1) 「(解説-D-1100-1)適用」には、「附属書 D 低合金鋼の母材部における疲労割れの渦電流探傷試験要領」が、文献「Development of the Eddy Current Testing (ECT) technique for the Feedwater nozzles of Nuclear Power Plant Reactor Pressure Vessels.,Vol.8, No.4, NT-82,EJAM」に基づき定められていることが記載されています。同文献で用いられたプローブの仕様について説明してください(適切な周波数とインピーダンスが選定されているかを含む)。
- (2) 附属書 D に関して、以下の(a)～(e)について検討した内容を説明してください。
- (a) 放射線照射の効果が、検出特性に与える影響
 - (b) 放射線によるノイズが検出結果に与える影響
 - (c) 水中で検出する場合と気中で検出する場合の結果の差
 - (d) 適用部位
 - (e) 各コイル方式への適用性
- (3) 附属書 D を追加したことで、本文規定と解説に附属書 D の規定内容が含まれることとなります。この点に関し、以下の(a)～(e)について説明してください。
- (a) 「2320 プローブ」(4)に「プローブには、必要に応じて磁気飽和機能を備えてもよい。」とされ、「(解説-3200-1)その他の渦電流による手法」に「その他の渦電流による手法として、磁気飽和機能を適用した場合と適用しない場合の信号を比較し、指示部の信号が電磁氣的信号によるものか否かを判定する方法などがある。」とされている。ここでいう「磁気飽和機能」について検討した内容。
 - (b) 「2330 対比試験片」の「(2)材料」には「対比試験片に用いる材料、試験部と電磁氣的特性が同等とする。」とあり、「(解説-2330-2)対比試験の材料」に

は、非磁性材料の例が記載されている。低合金鋼における電磁気的特性の同等性はどのように判断するのか。

- (c) 「2330 対比試験片」の「(5)人工欠陥の種類、形状及び寸法」には、人工欠陥の深さ及び幅が規定されているが、低合金鋼について検討した内容。
- (d) 「(解説-2120-1) 試験部の表面状態」に、「BWR 及び PWR の炉水で形成した固着スケール(ハードクラッド)は鉄やニッケルなどを主成分とする酸化皮膜であり、磁性成分が含まれている場合もある」とされている。ハードクラッドの磁性成分のノイズが検出結果に与える影響。
- (e) 「解説表 3100-2-1 信号の分類」は、低合金鋼にも適用可能であるか。

○回答

(1) 「(解説-D-1100-1)適用」には、「附属書 D 低合金鋼の母材部における疲労割れの渦電流探傷試験要領」が、文献「Development of the Eddy Current Testing (ECT) technique for the Feedwater nozzles of Nuclear Power Plant Reactor Pressure Vessels.,Vol.8, No.4, NT-82,EJAM」に基づき定められていることが記載されています。同文献で用いられたプローブの仕様について説明してください(適切な周波数とインピーダンスが選定されているかを含む。)

回答(1)

プローブの仕様のうち、方式および周波数については、資料 1-1 の 12 ページの表に示しております。プローブは、既に規格に規定する附属書 A～C の各プローブの中から採用しており、それぞれのプローブの適用周波数に対し、コイル寸法およびコイル間隔等が適切に設計されたものです。磁性体への適用においても、採用したプローブにて欠陥検出性等の検証を行い、引用文献に示した結果が得られ、プローブの有効性を確認しています。

電共研にて実施した試験マトリックスを表1に示します。周波数は TR パンケーキプローブについて 25kHz, 100kHz, クロス&パンケーキプローブについて 250kHz, 500kHz で実施しています。

インピーダンスについては、試験開始時および試験終了時に実施する基準感度、位相角の設定及び確認作業が支障なく行われることを持って適切なインピーダンスを有したプローブが使用されていることの証左となるため、試験データシートとして記録を残しておりません。

表 1 (1/2) 試験マトリックス

試験体				欠陥					プローブ種類					
試験体形状	材質	TP No.	表面状態/粗さ/酸化皮膜の有無	欠陥種類	欠陥 No.	方向	深さ	長さ	TR パンケーキ 25kHz, 100kHz 検出モード: V/H 走査方向: 直交・平行・45°	クロス&パンケーキ*1 250kHz, 500kHz 走査方向: 直交・平行・45°*2				
平板	SFVQ1A	1	機械加工	EDM ノッチ	1*3	-	0.5 ~ 5.0	∞*5, 8.4 ~ 26.6	欠陥検出 長さ測定	欠陥検出 長さ測定				
		2			2*4									
		SFVQ2A 相当			A						3			
	3		グラインダ SUS クラッド		4, 5									
	SFVQ1A	4	機械加工		6, 7									
		5	研磨		8, 9									
		6A	酸化皮膜 (走査面・亀裂内)		10, 11									
		6B	酸化皮膜 (走査面のみ)		12, 13									
		7*6	機械加工		14, 15, 16, 17, 18, 19, 20									
		8, 9, 10, 11	機械加工		疲労亀裂 (機械, 熱*7)						21, 22, 23, 24	-	0.5 ~ (5.0)*8	2.3 ~ 30.4
		12, 13, 14, 15									25, 26, 27, 28			

*1: 欠陥長さ測定はクロスコイルのみ実施

*2: 45° 方向走査は欠陥検出, パンケーキコイルのみ実施

*3: TR パンケーキコイルプローブのみ実施

*4: クロスコイル&パンケーキコイルプローブのみ実施

*5: 欠陥検出のみ実施

*6: 直行方向走査のみ実施

*7: 直交方向, 平行方向走査のみ実施

*8: (数値)は計画値を示す

表 1 (2/2) 試験マトリックス

試験体				欠陥					プローブ種類	
試験体形状	材質	TP No.	表面状態/粗さ/ 酸化皮膜の有無	欠陥種類	欠陥 No.	方向	深さ	長さ	TR パンケーキ 25kHz, 100kHz 検出モード:V/H 走査方向:直交	クロス&パンケーキ*1 250kHz, 500kHz 走査方向:直交
2次元押出R形状	SFVQ1A	16	機械加工	EDM ノッチ	29, 30, 31, 32, 33,	軸, 周 45°*9	0.5 ~	8.4 ~	欠陥検出 長さ測定	欠陥検出 長さ測定
		17			34, 35, 36, 37		5.0	26.6		
		18, 19, 20, 21		疲労亀裂 (機械)	38, 39, 40, 41	軸	1.4 ~ 5.0	13.8 ~ 26.9		
実機ノズル形状	SFVQ1A	22, 23, 24	機械加工 (研磨)	EDM ノッチ	42, 43, 44	軸, 周, 45°	1.0	11.8	欠陥検出 長さ測定	欠陥検出 長さ測定
		25	機械加工		45, 46					

*1: 欠陥長さ測定はクロスコイルのみ実施

*9: クロス&パンケーキコイルプローブは欠陥検出のみ実施

(2) 附属書 D に関して、以下の(a)～(e)について検討した内容を説明してください。

- (a) 放射線照射の効果が、検出特性に与える影響
- (b) 放射線によるノイズが検出結果に与える影響
- (c) 水中で検出する場合と気中で検出する場合の結果の差
- (d) 適用部位
- (e) 各コイル方式への適用性

回答(2)

(a) 検出特性に与える影響はないと考えます。

渦電流検査は数時間の測定のため、計測に与える影響はありません。また、放射線照射による材料の電磁気特性変化の影響は小さく、検出特性への影響はないと考えます。

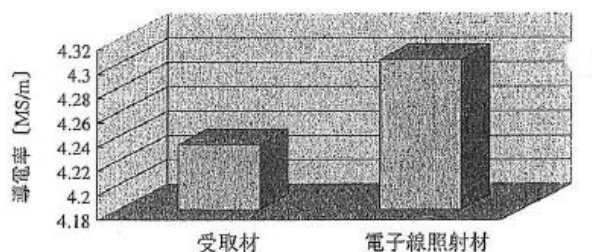
ここでは、きずの検出性に対する影響因子である導電率および比透磁率について説明します(次ページ)。

導電率:文献1の第4図では、照射による導電率 σ の変化は約2%増、文献2の図13では約11%増です。ここで、このECTの検出性の指標である浸透深さ δ は下式で与えられます。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

ここで、 f は周波数、 μ は透磁率です。これより、 σ が11%変化した場合、 δ は約5%の低下に留まることから、照射による導電率の変化がECTの検出性に与える影響は小さいと考えます。

(a-1) 文献1 第4図



第4図 電子線照射材の導電率測定結果

(a-2) 文献2 図13

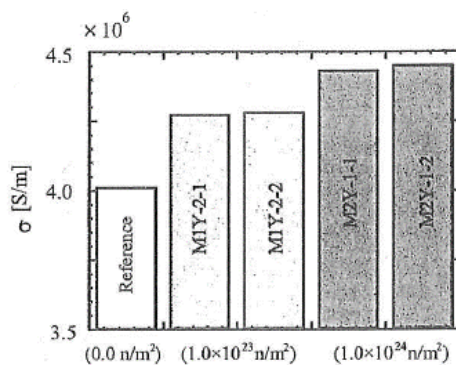


図13 中性子照射による導電率の変化

Fig. 13. Change of σ with neutron irradiation.

項番	著者、文献名など	参照図
文献1	中東 他、「電磁気的手法による原子炉圧力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価」、検査技術、P.9-16(2008.3)	第4図
文献2	高橋 他、「中性子が照射された SQV2A 鋼の電磁気特性」、電気学会マグネティックス研究会資料、Vol.MAG-07、P.5-P.10 (2007.12)	図10、 図13

比透磁率: 文献2の図10、文献3の図3-1-1(b)において、比透磁率 μ_s が示されていますが、ECTで用いる磁束密度 B は0.1Tより小さいため、比透磁率 μ_s はほとんど変化しません。従って、ECTの検出性に与える影響は小さいと考えます。

(b-1) 文献2 図10

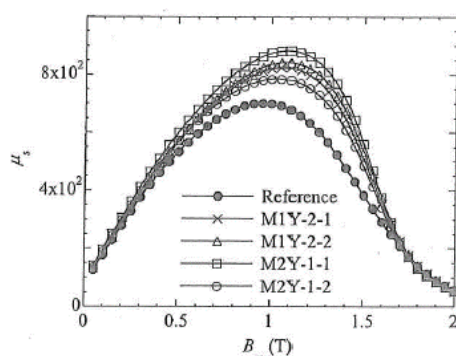


図10 中性子照射がSQV2A鋼の μ_s - B_m 曲線の与える影響

Fig. 10. Effect of neutron irradiation on μ_s - B_m curves of SQV2A steel.

(b-2) 文献3 図3-1-1 (b)

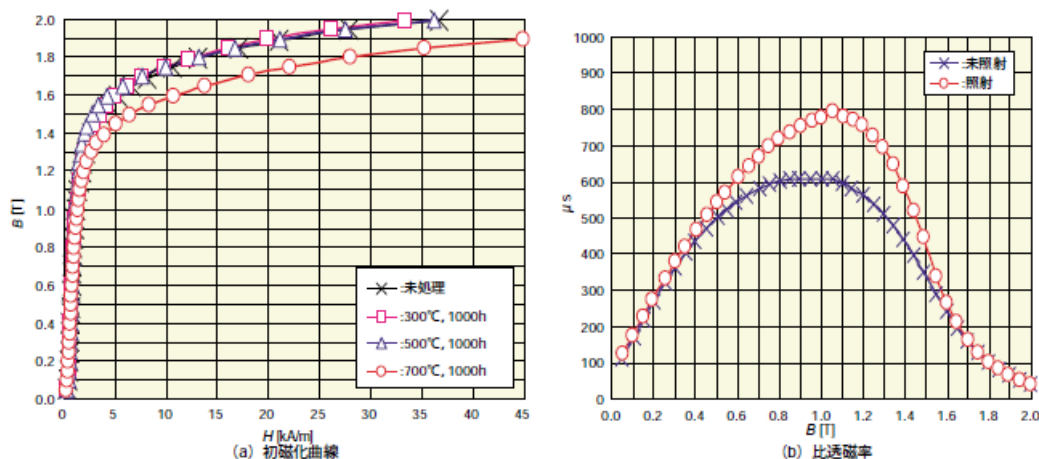


図3-1-1 未照射材と照射材の初磁化曲線(a)と比透磁率(b)

項番	著者、文献名など	参照図
文献2	高橋 他、「中性子が照射された SQV2A 鋼の電磁気特性」、電気学会マグネティクス研究会資料、Vol.MAG-07、P.5-P.10 (2007.12)	図10、 図13
文献3	中東 他、「電磁気的手法による圧力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価」、溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー、vol.2、P.34-P.40 (2006)	図 3-1-1(b)

(b) 検出結果に与える影響はないと考えます。

放射線ノイズはプローブおよび原子炉内のケーブルに重畳する可能性があります。渦電流の測定周波数に比べ短時間の信号変化であるため、計測信号から分離した評価が可能です。

また、放射線ノイズ以外のノイズ要因として、ケーブルが長い場合にノイズを拾いやすい傾向がありますが、高シールドケーブルやプリアンプ(中間増幅器)の使用により SN 比を確保することが可能です。プリアンプの配置は作業環境に応じて検討が行われ、気中だけでなく、材料の放射化影響が小さい低線量エリアでは、プリアンプを水中に配置することもあります。

高シールドケーブルのメーカー仕様について下記に示します。

株式会社SRT スーパーローノイズ同軸ケーブル SLNC シリーズ

<http://www.srt.jp/products.html>

(c) 検出結果の差はないと考えます。

オーステナイト系ステンレス鋼を用いた試験において、水中および気中での検出結果の差は生じていません。また、水の導電率に対して、低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の導電率は十分大きいです。そのため、低合金鋼での試験においてもオーステナイト系ステンレス鋼と同様に検出結果の差は生じません。

対象	導電率
鋼材	4×10^6 S/m (上記文献 2 より)
オーステナイト系 ステンレス鋼	$1.2 \sim 1.3 \times 10^6$ S/m (解説表-2330-2-1)
水	1~10 mS/m

(d) 原子力発電用機器のうち、原子炉圧力容器を代表とする低合金鋼を対象としています。

規格制定に当たっては、平板試験片により試験性能を確認した後、BWR プラントの給水ノズルコーナー部を適用部位として想定したモックアップ試験により、適用性を確認しています。

(e) 表1試験マトリックスで示すように、文献「Development of the Eddy Current Testing (ECT) technique for the Feedwater nozzles of Nuclear Power Plant Reactor Pressure Vessels., Vol.8, No.4, NT 82, EJAM」に記載の TR パンケーキ(相互誘導形標準比較方式)、クロスコイル & パンケーキ(クロスコイル: 自己誘導形自己比較方式、パンケーキ: 自己誘導形標準比較方式)について検証を行い、附属書Dに反映しています。

(3) 附属書 D を追加したことで、本文規定と解説に附属書 D の規定内容が含まれることとなります。この点に関し、以下の(a)～(e)について説明してください。

- (a) 「2320 プローブ」(4)に「プローブには、必要に応じて磁気飽和機能を備えてもよい。」とされ、「(解説-3200-1)その他の渦電流による手法」に「その他の渦電流による手法として、磁気飽和機能を適用した場合と適用しない場合の信号を比較し、指示部の信号が電磁氣的信号によるものか否かを判定する方法などがある。」とされている。ここでいう「磁気飽和機能」について検討した内容。
- (b) 「2330 対比試験片」の「(2)材料」には「対比試験片に用いる材料、試験部と電磁氣的特性が同等とする。」とあり、「(解説-2330-2)対比試験の材料」には、非磁性材料の例が記載されている。低合金鋼における電磁氣的特性の同等性はどのように判断するのか。
- (c) 「2330 対比試験片」の「(5)人工欠陥の種類、形状及び寸法」には、人工欠陥の深さ及び幅が規定されているが、低合金鋼について検討した内容。
- (d) 「(解説-2120-1)試験部の表面状態」に、「BWR 及び PWR の炉水で形成した固着スケール(ハードクラッド)は鉄やニッケルなどを主成分とする酸化皮膜であり、磁性成分が含まれている場合もある」とされている。ハードクラッドの磁性成分のノイズが検出結果に与える影響。
- (e) 「解説表 3100-2-1 信号の分類」は、低合金鋼にも適用可能であるか。

回答(3)

- (a) 文献「Development of the Eddy Current Testing (ECT) technique for the Feedwater nozzles of Nuclear Power Plant Reactor Pressure Vessels., Vol.8, No.4, NT 82, EJAM」に示す試験では、磁気飽和が必要とされる電磁氣的ノイズは確認されませんでした。そのため、ご指摘のように、本文は全ての附属書に関することですが、附属書 D で記す範囲においては検討しておりません。
- (b) 「解説-2330-2 対比試験片の材料」に関する表現は、渦電流探傷検討会で繰り返し議論しました。しかし、低合金鋼の電磁氣特性を示す文献が見つからず、現在の表現となっています。EJAM に示す電力共研の試験体は、材質、製造加工方法および熱処理を同等としました。実際のプラント適用においても、同様の考えで対比試験片は準備します。なお、現場測定において、「信号の分類」のうち欠陥以外の信号の特性を比較することで照射効果の影響の有無は確認できると考えます。
- (c) 探傷面開口欠陥の検出を想定しているため、非磁性体と同じ仕様の人工欠陥を採用しています(下図参照)。

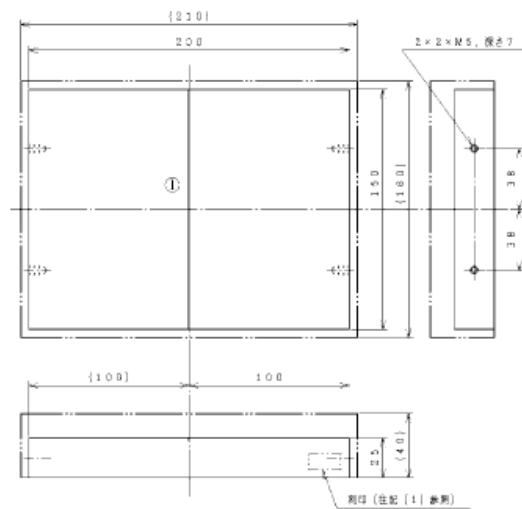


表1. 欠陥 (模擬亀裂) 仕様 単位: mm

No.	深さ	長さ	幅目標
①	1.0	∞	0.3 (最大0.5)

対比試験片の概要

- (d) 酸化被膜の有無は検出性に影響がないと考えます。プラント据付け前に付着した酸化被膜は除去しています。従って、電共研での試験体においては、試験体加工時の酸化被膜は除去した後、運転中の炉水で形成した固着スケールを模擬するため、オートクレーブ処理により酸化被膜を形成して試験に用いました。酸化皮膜有無の影響確認試験にて、プローブ走査面および EDM ノッチ内に酸化被膜を付与した試験体に対する試験結果を表2に示します。いずれも指示部の抽出基準である、基準電圧の 20%以上を超えて欠陥を検出しており、酸化皮膜がない場合と同等の結果です。

表2 プローブ走査面および EDM ノッチ内に酸化被膜を付与した試験体の検出結果

プローブ	欠陥 No.11 (深さ 1.0mm, 長さ 11.8mm) TP-6A											
	直交方向走査				平行方向走査				45° 方向走査			
TR パンケーキ*1	25kHz		100kHz		25kHz		100kHz		25kHz		100kHz	
	◎/◎		◎/◎		◎/◎		◎/◎		◎/◎		◎/◎	
クロス& パンケーキ	クロス		パン ケーキ		クロス		パン ケーキ		クロス		パン ケーキ	
	250 kHz	500 kHz	250 kHz	500 kHz	250 kHz	500 kHz	250 kHz	500 kHz	250 kHz	500 kHz	250 kHz	500 kHz
	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	—	◎	◎

◎: 基準感度の 20%以上かつ SN 比 4 以上で検出可能

—: 試験対象外

*1: V 検出モードの結果/H 検出モードの結果

(e) 適用可能です。低合金鋼においても、欠陥と欠陥以外の信号は解説表に示す信号分類で整理できます。