



規格基準動向

## 原子力発電所用機器における渦電流探傷試験に係わる日本電気協会技術指針 (JEAG4217)

日本電気協会 構造分科会 (渦電流探傷試験検討会)

東北大学

東京電力(株)

日立 GE ニュークリア・エナジー(株)

高木 敏行 Toshiyuki TAKAGI

徳間 英昭 Hideaki TOKUMA

野中 善夫 Yoshio NONAKA

### 1. はじめに

国内の原子力発電所は、機器ごとに適切な周期で様々な検査が行われている。この検査で、万が一、き裂が見つかった場合は、日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (以下、維持規格と略す) 等に従い、健全性評価が行われている。また、必要に応じ、補修などの適切な処置が行われ、機器の健全性が確保されている。

例えば、原子力発電所の主要機器の一つである原子炉圧力容器等の検査には、目視試験、表面試験、体積試験などがある。この目視試験は、主に水中カメラが利用されているが、その代わりとして超音波探傷試験または渦電流探傷試験の適用も考えられ、維持規格ではその適用を認めている。

また、近年、国内の加圧水型軽水炉の主要機器に渦電流探傷試験が適用され<sup>[1]</sup>、き裂を検出し、補修が行われるなど、活用されている。

この様な背景から、2007年8月に社団法人 日本電気協会の原子力規格委員会 構造分科会に、渦電流探傷試験検討会 (以下、ECT 検討会と略す) が発足し、渦電流探傷試験の指針策定作業が開始された。ECT 検討会は、産業界、学界、規制当局から選出された計23名の委員で構成され、この検討会で指針の素案を策定し、構造分科会及び原子力規格委員会による審議と社会から意見を求める公衆審査を経て、2010年3月に、原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 (JEAG4217-2010) が発行された。

本指針は、軽水型原子力発電所用蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦電流探傷試験指針 (JEAG4205-2005) に次ぐ原子力発電所用機器の渦電流探傷試験の指針となるが、上置プローブによる渦電流探傷試験の指針は初めてのものであり、原子力産業はもとより、他の産業界での利用も期待される。

本記事では、原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 (JEAG4217-2010) の主な内容について解説する。

### 2. JEAG4217-2010 の概要

#### 2.1 適用範囲

原子力発電所用機器の渦電流探傷試験の指針には、2005年に発行された軽水型原子力発電所用蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦電流探傷試験指針 (JEAG4208-2005) があり、加圧水型軽水炉の蒸気発生器伝熱管を対象に内挿プローブで試験を行う場合に適用されている。一方、本指針は伝熱管などの細管以外のオーステナイト系ステンレス鋼又は高ニッケル合金の母材と溶接部で構成される機器を対象に、上置プローブを用いて試験を行う場合に適用され、加圧水型軽水炉の原子炉圧力容器出口/入口/安全注入系管台異材継手や蒸気発生器出口/入口/管台異材継手、沸騰水型軽水炉のシュラウドやシュラウドサポートの継手など、原子炉圧力容器や一次冷却系の主要機器の渦電流探傷試験に適用できる。

#### 2.2 本章と附属書

本指針の策定では、高い信頼性が求められる原子力発電所の検査事情を踏まえ、既存の知見に加え独立行政法人 原子力安全基盤機構 (JNES) の次に示す非破壊検査技術実証事業で得られた客観的な最新知見<sup>[2],[3]</sup>を参考に指針を策定した。

- a. 低炭素ステンレス鋼溶接部の非破壊検査技術実証 (NSA)
- b. ニッケル基合金溶接部の非破壊検査技術実証 (NNW)

これらの事業では、シュラウドサポートなどの炉内

構造物、CRD スタブチューブ/RPV 取付溶接部などの原子炉圧力容器貫通部、RV 出入口管台溶接部などの異材継手部の模擬試験体に付与された応力腐食割れ (SCC) によるき裂を用いて、次に示す手法の欠陥検出と開口長さ測定に係る性能が確認されている。

- a. クロスコイル (自己誘導形自己比較方式, 相互誘導形自己比較方式及び標準比較方式)
- b. パンケーキコイル (自己誘導形自己比較方式, 相互誘導形標準比較方式)

また、近年、渦電流探傷法に関する研究、開発が積極的に行われており、上記の手法以外にも様々な手法が提案されている。この様な研究、開発の動向を踏まえ、将来的に新たな手法の要領を指針に取り込められるよう、本指針は本章と附属書とで構成している。本章は、手法によらない共通要領についての規定で、検査の信頼性を確保しつつ、新たな手法を導入できるよう考慮している。また、附属書は、図1及び図2の手法の個別の要領についての規定で、手法毎の特徴を考慮した具体的要求事項と注意すべき事項について規定している。

### 2.3 構成

本指針の構成を、表1に示す。本章と附属書は、渦電流探傷試験の実務の流れに沿って、総則、試験要領、欠陥検出と長さ測定要領、記録要領の順で規定内容を記載している。

総則には、目的や適用範囲など、本指針を利用する場合の前提を記載し、試験要領には、試験部に対する要求、試験員と試験評価員に対する要求、使用機材の性能に係る要求、その性能確認など、試験を行う上での前提を記載した。また、試験前に行う基準感度、位相角の設定、試験後に行う基準感度、位相角の確認、試験時のプローブ走査条件を記載しており、試験の実施にあたっては、この章の要領に従い試験を行うことができる。

欠陥検出と長さ測定要領には、試験要領に従い採取した試験データから、欠陥の疑いのある指示部を抽出し、欠陥判定を行う要領と欠陥長さ測定の要領について規定した。欠陥長さ測定は、本指針に従い検出したき裂の他に、目視試験など、他の試験方法で検出したき裂に対しても適用できる。

記録要領には、記録の作成手順と内容を規定した。

本章と各附属書には解説を設け、本文に記載する規定内容の補足説明、根拠、解釈、確認方法などの具体例などを詳しく記載し、利用者が規定内容の意図を理解し、誤解なく試験ができるよう配慮した。

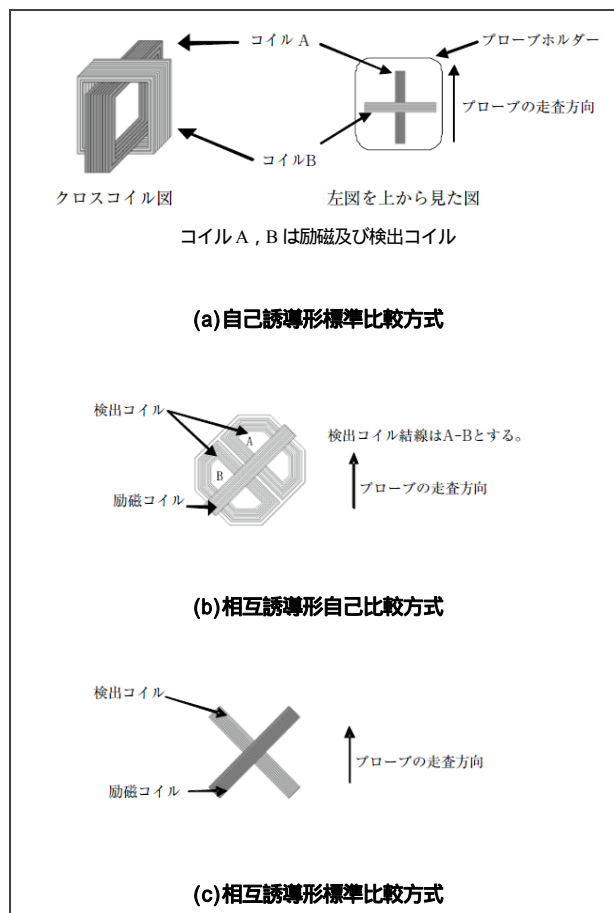


図1 クロスコイル (附属書A)

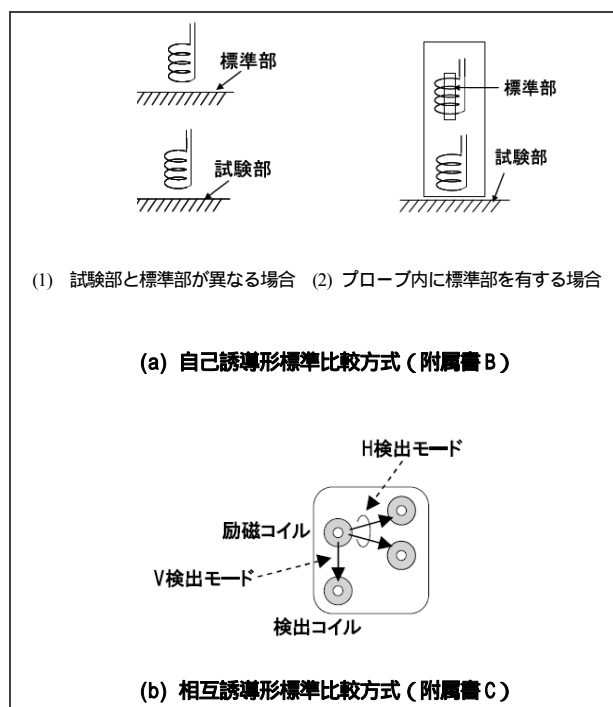


図2 パンケーキコイル

表 1 JEAG4217 の構成

本章	原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 第 1 章 総則 第 2 章 試験要領 第 3 章 欠陥検出及び欠陥長さ測定要領 第 4 章 記録要領 解 説
附属書 A	附属書 A クロスコイル (自己誘導形自己比較方式, 相互誘導形自己比較方式及び標準比較方式) の渦電流探傷試験要領 A - 1000 総則 A - 2000 試験要領 A - 3000 欠陥検出及び欠陥長さ測定要領 A - 4000 記録要領 附属書 A 解説
附属書 B	附属書 B パンケーキコイル (自己誘導形標準比較方式) の渦電流探傷試験要領 B - 1000 総則 B - 2000 試験要領 B - 3000 欠陥検出及び欠陥長さ測定要領 B - 4000 記録要領 附属書 B 解説
附属書 C	附属書 C パンケーキコイル (相互誘導形標準比較方式) の渦電流探傷試験要領 C - 1000 総則 C - 2000 試験要領 C - 3000 欠陥検出及び欠陥長さ測定要領 C - 4000 記録要領 附属書 C 解説

### 3 . 規定と解説

#### 3.1 第 1 章 総則

この章は、1100 項から 1400 項で構成している。1100 項 使用目的と 1200 項 適用範囲には、本指針がオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の母材部及び溶接部を対象とし、上置プローブを用いた探傷面に開口した欠陥の検出及び長さ測定の要領であることを定めている。

また、その解説に、附属書にない手法を適用する場合の取り扱いについて記載しており、附属書にない手法を適用する場合は、本章の要領に従い欠陥の疑いのある指示部の抽出、欠陥判定及び長さ測定が可能であることを確認し、本章の要領に従い試験を行う。

#### 3.2 試験要領

この章は、2010 項から 2720 項で構成している。試験要領の主な内容を次に示す。

##### (1) 2010 項 事前確認

この項には、試験に用いる手法の検出精度及び長さ測定誤差の事前確認を規定している。事前確認の方法については、本指針による渦電流探傷試験が平面から三次元的な曲面形状の幅広い機器に適用でき、統一的な確認方法の規定が難しい事情を踏まえ、解説に事前確認に使用する試験体の形状、模擬欠陥の種類と寸法の考え方や平面と曲面で性能が変わらないプローブを使用する場合の確認方法の具体例などを記載した。

##### (2) 2200 項 試験員及び試験評価員

この項には、試験員と試験評価員に対する要求を規定している。試験員は JIS Z 2305 によって認証された ET レベル 1 以上の有資格者、又はこれらと同等以上の技術レベルを有する者で、試験に用いる手法の特徴を理解した者と定めた。試験員の資格は JIS Z2305 の NDT レベルに従い規定し、渦電流探傷試験での信号の現れ方が手法毎に異なる事情を踏まえ、試験に用いる手法の特徴の理解を要求した。

また、試験評価員は JIS Z 2305 によって認証された ET レベル 2 以上の有資格者、又はこれらと同等の技術レベルを有する者で、試験に用いる手法の特徴を理解し、試験部に関する知識を有する者と定めた。試験評価員の資格は、試験員と同様に、JIS Z2305 の NDT レベルに従い規定した。また、渦電流探傷試験の原子力発電所用機器への適用実績が少なく試験部特有の信号や欠陥判定に迷う信号などが出現した場合の対応に備え、試験評価員には試験部に関する知識、即ち、試験部の設計 (材料、構造及び使用環境など) 並びに試験部あるいは試験部と類似した原子力発電所用機器の損傷事例などの知識をもつことを要求した。

##### (3) 2500 項 基準感度、位相角の設定及び確認

この項には、基準感度、位相角の設定と確認の方法と時期を規定している。基準感度はリサージュ波形の振幅が十分読み取れる感度に設定し、位相角は欠陥検出又は長さ測定に適した角度に設定することを定めた。また、本章の解説と附属書に、具体的な設定方法を記載した。基準感度と位相角の設定方法の一例を、図 3 に示す。基準感度と位相角の設定方法には、リフトオフ信号などの代表的な欠陥以外の信号をインピーダンス平面の X 軸上に現れるように設定する方法と欠陥信号が Y 軸上に現れるように設定する方法などがあり、このような設定を試験前に行う。

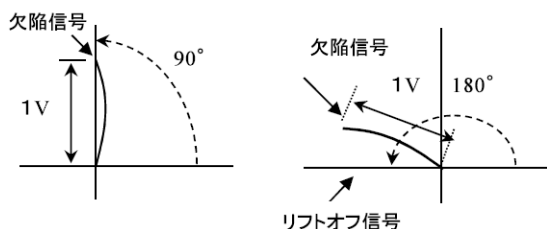
また、試験中又は試験後に基準感度、位相角の確認を行うことを定めた。この確認で前回の基準感度に比べて2dB、又は前回の位相角に比べて5°を超えて変化した場合は、その間の試験は無効となり、再試験を行うことになる。

**(4) 2600 項 試験周波数**

この項には、欠陥検出に有効な複数の周波数を選定することを規定している。複数の周波数は試験コイルの特性や欠陥判定要領を踏まえて設定するが、その具体例を附属書の解説に記載した。

**(5) 2700 項 プロブの走査**

この項には、試験における走査ステップ、走査速度、探傷感度などを規定している。また、プローブは試験部表面に対し所定の角度に保持し、表面に密着した状態で走査することを規定しており、実際の試験においては、適切な押付条件を設定する必要がある。



(a) 出力信号を90°に設定した例 (b) リフトオフ信号を180°に設定した例

**図3 基準感度、位相角の設定方法(附属書B)**

**3.3 第3章 欠陥検出及び欠陥長さ測定要領**

この章は、3100 項から 3300 項で構成している。欠陥検出と欠陥長さ測定要領の主な内容を次に示す。

**(1) 3100 項 欠陥の疑いのある指示部の抽出**

欠陥検出では、探傷データをもとに欠陥の疑いのある指示部を抽出し、欠陥判定を行う。この項では、欠陥の疑いのある指示部の抽出要領を規定している。

本指針では、欠陥の疑いのある指示部の抽出に、原則、図4に示すような抽出基準「基準感度の20%以上の指示部」を適用することを定めた。この抽出基準は、試験員の技量差に起因する抽出レベルのばらつきの抑制を重視し、NNWの成果を踏まえ定めたもので、深さ1mmのSCCき裂を検出できる。また、この抽出基準は、図4(a)に示すようなドリフト信号のレベルが低い場合に有効で、表2に示すように基準感度の20%を境に色調を変える二値化表示を用いて欠陥の疑いのある指示部を抽出するとよい。また、図4(b)に示すように、ドリフト信号のレベルが高い場合は、ドリフト除去装

置を用いて図4(a)に示すような状態に近づけ、二値化表示で欠陥の疑いのある指示部を抽出するとよい。この様に、本指針では、ドリフト除去処理法の使用を認めているが、ドリフト除去装置の使用にあたっては、ドリフト除去前後で指示部のピーク部とその周辺の出力電圧差が大きく変わらないことを確認する必要がある。

本指針は、SN比や波形の特徴など、他の抽出基準の適用も認めている。他の抽出基準を適用する場合は、基準感度の20%以上の指示部より高い抽出性能、即ち、より小さいき裂を検出できることを確認する必要がある。SN比を用いた抽出基準は、ノイズレベルが高い場合などに、基準感度の20%以上の指示部より高い抽出性能を確保できない可能性があるため、本指針では基準感度の20%以上の指示部を抽出し、さらに目視で確認できる指示部を抽出する方法を推奨した。また、波形の特徴を利用して指示部を抽出する方法についても性能を確認すれば適用できる。但し、波形の特徴を数値化し、定量的に扱う必要がある。この様に波形の特徴を数値化し、欠陥以外の信号を除去し、欠陥の疑いのある指示部を抽出した図5に示す具体例を、附属書Cの解説に記載した。

本指針は、このような自動抽出技術を、性能確認を前提に適用できるようになっている。

**(2) 3200 項 欠陥判定**

この項には、3100 項の要領で抽出した欠陥の疑いのある指示部について欠陥判定を行う要領を規定している。欠陥判定は、渦電流探傷試験で得られるリサージュ波形と振幅チャートをもとに、欠陥と欠陥以外の信号を区別しながら行う。この作業では、試験部で予想される欠陥以外の信号のリサージュ波形及び振幅チャートが必要となるため、リフトオフ信号、表面うねり信号、形状信号、電磁気的信号などの信号を実験または解析により求めることを定めた。

欠陥以外の信号の測定例を表3に示す。欠陥や欠陥以外の信号の現れ方は、手法、試験周波数で異なるため、試験に用いる手法、試験周波数で欠陥以外の信号を測定又は解析することが重要である。

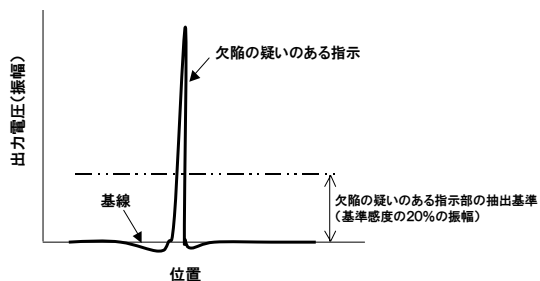
この様な手順で求めたリサージュ波形及び振幅チャートを、欠陥の疑いのある指示部のリサージュ波形及び振幅チャートと比較しながら、欠陥以外の信号と区別し欠陥判定を行う。しかし、この判定で欠陥かどうかを判定できない場合は、原則、欠陥とみなすが、その他の渦電流による手法を用いて欠陥判定を行うこともできる。なお、他の非破壊検査手法の試験結果との

組合せによる総合的な欠陥判定は、この指針の適用外となるので注意しなくてはならない。

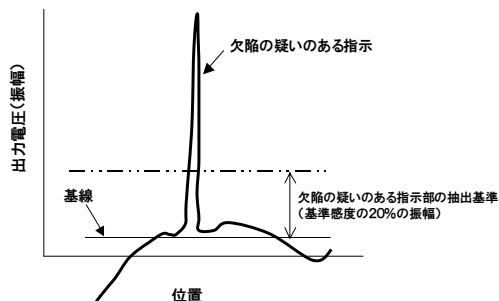
### (3) 3300 項 欠陥長さ測定

この項には、欠陥長さの測定要領を規定している。欠陥長さ測定は、3200 項の要領に従い判定した欠陥指示だけでなく、目視試験などの他の非破壊検査で判定した欠陥指示についても適用できる。指示長さの測定方法としては、図 6 に示すような信号消失指示長さと 12dB ドロップ指示長さなどがあり、振幅チャートにより欠陥長さ方向の端部に該当する振幅の位置座標を求め、その座標をもとに指示長さを求める。なお、適切な測定方法は使用目的、試験コイルの特性や測定精度などを考慮して選択するとよい。

また、この項には、複数の隣接指示群の長さ測定についても規定している。この規定では、維持規格の「線状欠陥の取り扱い」の考え方を参考に、図 7 に示すように、複数の隣接指示群を一つの欠陥指示とみなし、その集合体の長さを測定することを認めている。これは、指示群の個々の指示部を長さ測定した場合に想定される膨大な記録作業の対策について規定したもので、一つの欠陥指示とみなした複数の隣接指示群が記録として確認できるように、4 章にその記録について規定した。





(a) 基線を零電圧レベルとする場合



(b) 基線をピーク電圧部の直前または直後のうち出力電圧が低い方とする場合

図 4 基準感度の 20% の定義

表 2 二値化法による指示部の抽出例 (附属書 A)

しきい値	C スコープ画像
(2 値化なし)	 指示は白枠の位置
20%	 2 値化表示について：濃色部(しきい値以上), 薄色部(しきい値未満)

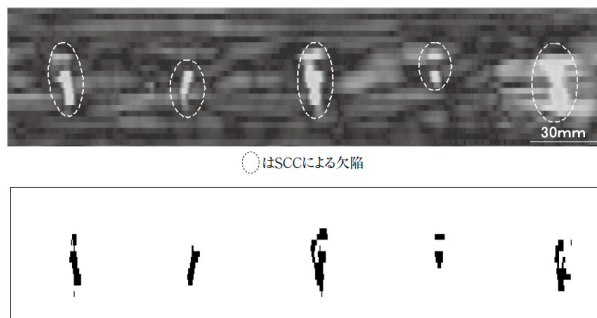
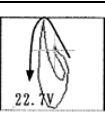
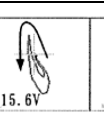
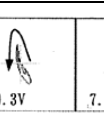
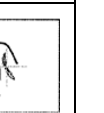
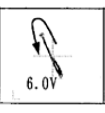
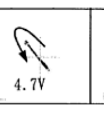
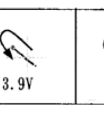
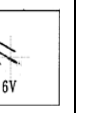

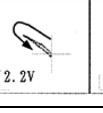
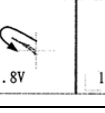



図 5 波形の特徴を利用した指示部の自動抽出例 (附属書 C)

表 3 欠陥以外の信号の測定例 (附属書 A)

		低周波数	高周波		
ノイズ	境界信号	 22.7V	 15.6V	 10.3V	 7.2V
	電磁気的 信号	 6.0V	 4.7V	 3.9V	 3.6V
	形状 信号	 2.9V	 2.2V	 1.8V	 1.6V

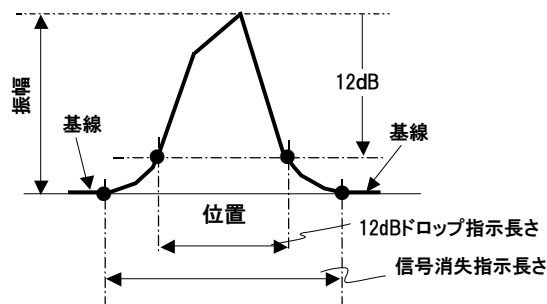


図 6 欠陥長さ測定方法

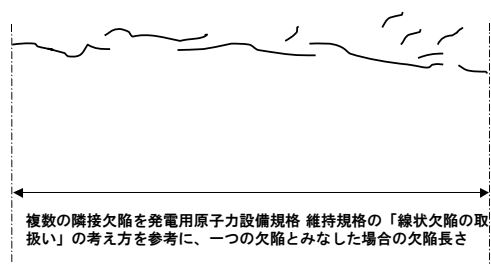


図7 複数欠陥を一つの欠陥とみなした場合の欠陥長さ

### 3.4 第4章 記録要領

この章は、4100 項と 4200 項で構成している。記録要領の主な内容を次に示す。

#### (1) 4100 項 記録手順

この項には、C スコープ表示、最大振幅、位相角及び座標の記録要領を規定している。C スコープ表示は、試験範囲の指示分布を把握するために、欠陥の識別に適した色調で試験部の全範囲について作成する。また、再試験を行った場合は、その範囲についても作成し、記録として残す。

最大振幅、位相角及び最大振幅座標の記録は、3100 項で抽出した欠陥の疑いのある指示部を対象に行う。欠陥の疑いのある指示部は 3200 項の要領に従い欠陥判定を行うが、その際に利用したリサージュ波形などから最大振幅、位相角及び最大振幅の座標を読み取り、それらと欠陥判定結果を記録する。

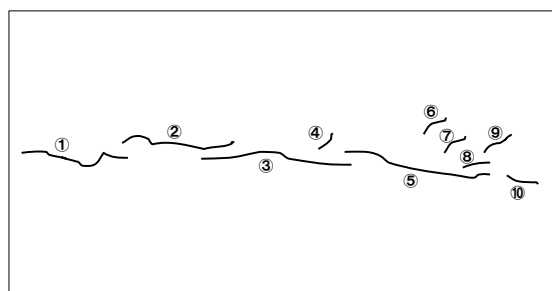
欠陥長さ測定を行った場合は 3300 項の要領に従い、欠陥長さを測定し、欠陥の長さ方向端部の座標と欠陥長さを記録する。

#### (2) 4200 項 記録内容

この項には、記録を要する指示と記録内容が規定されている。記録は、3100 項で抽出した欠陥の疑いのある指示部を対象とする。但し、欠陥以外の信号が多数認められる場合などに想定される膨大な記録作業の対策として、3200 項の欠陥判定により、欠陥以外の信号と判定された指示部については C スコープ表示に明示し、その代表的な波形例を記録として残すのみでよいことを定めた。即ち、実際の試験では、欠陥指示と代表的な欠陥以外の指示の最大振幅、位相角及び最大振幅座標の記録と欠陥以外の信号と判定された指示部が分かるように明示した全範囲の C スコープ表示を、記録として残すとよい。

記録内容では、記録と試験部とが照合できるように、記録に残す項目と記録の保管を要求している。記録に残す項目とは、発電所名、試験年月日、試験条件、校正記録、試験要領書番号、電子媒体番号、試験結果な

どである。また、ドリフト除去装置、欠陥の疑いのある指示部の自動抽出など評価にかかわる前処理を適用した場合は、試験結果に処理装置の管理番号を記録する。更に、複数の隣接欠陥を一つの欠陥とみなし長さ測定を行った場合は、一つの欠陥とみなした複数の隣接指示群を確認できるよう、図 8 のような C スコープ表示などを記録に残す。



①～⑩：複数の隣接欠陥を発電用原子力設備規格 維持規格の「線状欠陥の取扱い」の考え方を参考に、一つの欠陥とみなした指示群

図8 複数欠陥を一つの欠陥とみなした場合に残す記録例

## 4 . 結言

本記事では、2010 年 3 月に発行された原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 JEAG4217-2010 について紹介した。この指針は、高い信頼性が求められる原子力発電所の検査への適用が期待され、原子力発電所の安全性の確保と信頼性の向上に寄与するものと考えている。また、この指針は、原子力産業だけではなく、他の産業界でも利用でき、渦電流探傷試験が様々な産業分野で広く普及し、渦電流探傷技術が検査技術として発展を遂げることを期待している。

今回、発行した指針により、これから使用実績が蓄積されるようになるが、この指針を利用する皆様の率直なご批判とご助言を頂き、本指針の追補や改定に反映したいと考えている。

## 参考文献

- [1] 経済産業省 報道発表, 関西電力(株)大飯発電所 3 号機原子炉容器 A ループ出口管台溶接部の損傷の原因と対策について, 2008 年 9 月 26 日
- [2] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 18 年度低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証に関する事業報告書 [総括版], 07 基材報-003
- [3] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 20 年度ニッケル基金合金溶接部の非破壊検査技術実証に関する事業報告書, 09 原高報-006

(平成 22 年 5 月 13 日)