

# リモートフィールド渦電流探傷法による配管外面欠陥検出の高感度化

Sensitive Technique for Detecting Outer Defect on Tube with Remote Field Eddy Current Testing

(株) 東芝	小林 徳康	Noriyasu KOBAYASHI	Nonmember
(株) 東芝	長井 敏	Satoshi NAGAI	Nonmember
(株) 東芝	落合 誠	Makoto OCHIAI	Nonmember
(株) 東芝	神保 昇	Noboru JIMBO	Nonmember
(株) 東芝	小舞 正文	Masafumi KOMAI	Nonmember

In the remote field eddy current testing, we proposed the method of enhancing the magnetic flux density in the vicinity of an exciter coil by controlling the magnetic flux direction for increasing the sensitivity of detecting outer defects on a tube and used the flux guide made of a magnetic material for the method. The optimum structural shape of the flux guide was designed by the magnetic field analysis. On the experiment with the application of the flux guide, the magnetic flux density increased by 59 % and the artificial defect detection signal became clear. We confirmed the proposed method was effective in a high sensitivity.

**Keywords:** Remote Field Eddy Current Testing, High Sensitivity, Outer Defect, Exciter Coil, Flux Guide

## 1. 緒言

新型高速炉の蒸気発生器として、信頼性向上の観点から組網線入り二重伝熱管構造が検討されている。本構造の伝熱管は内管と外管から構成されており、両管の隙間部には組網線が配置されている。組網線入り二重伝熱管構造実用化ポイントのひとつは検査技術の確立であり、特に外管外面の微小欠陥検出の感度向上が課題となっている。外管の欠陥検査にはリモートフィールド渦電流探傷法(RF-ECT: Remote Field Eddy Current Testing)の適用が有力候補であり、更なる高感度化が検討されている[1]。本開発では高感度化手法として、配管内表面における励磁コイル近傍の磁束密度を高めることに着目し、励磁コイルに磁性体を配置することで、発生する磁場の方向を制御して磁束密度を高めるプローブを考案した。ここでは、磁場解析による磁性体形状設計と本手法の感度向上に対する効果を基礎試験により検証したので報告する。

## 2. 高磁束密度化手法

Schmidt の報告[2]によると、Fig.1 に示すように、RF-ECT での間接磁場形成には励磁コイル近傍で配管周方向に誘起される渦電流が寄与する。また、安西らのモデル[3]によると間接磁場は式(1)で表される。

連絡先: 小林徳康、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町8、  
(株) 東芝 電力・社会システム技術開発センター、  
電話: 045-770-2307、  
e-mail:noriyasu.kobayashi@toshiba.co.jp

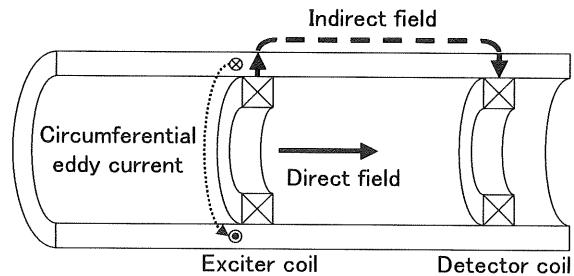


Fig. 1 Principle of RF-ECT

$$H_{ECn} = c(1+c)^n H_0 \quad (1)$$

ここで、 $n$ は配管軸方向の領域分割数、 $H_{ECn}$ は領域  $n$ において直接磁場が誘起する渦電流による間接磁場、 $c$ は領域  $n$ において直接磁場から間接磁場が生じる比率、 $H_0$ は励磁コイルが存在する領域  $0$ における直接磁場である。式(1)から、高感度化として間接磁場強度を高めるためには比率  $c$ と励磁コイル近傍の直接磁場強度  $H_0$ を大きくすれば良いことがわかる。本開発では、まず  $H_0$ を高めることとした。励磁電流を大きくすることはコイルサイズを大型化するため、他の手法を検討した。考案した手法を Fig.2 に示す。励磁コイルの両底面に円形の磁性体を配置し、励磁コイルが発生する磁束を強制的に制御する磁路(FG: Flux Guide)を形成する。励磁コイルを構成する有限長ソレノイドは長岡係数に比例して内部の磁束密度が低下するので、FG の適用により、この低下分を抑制し、磁束密度を高めることができる。

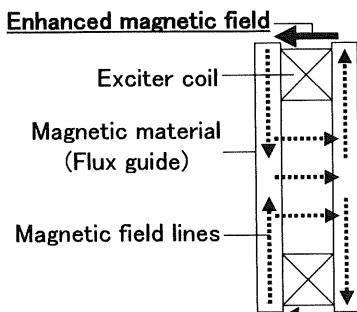


Fig. 2 Method for high magnetic field intensity

### 3. 磁場解析による設計

まず、FG 有無の条件で高磁束密度化に対する効果の確認を行った。FG の材質は炭素鋼とした。また、厚さに関しては、試験時に磁気飽和することを避け、飽和磁束密度の 35%で動作する条件である 0.2mm とした。解析での励磁周波数は 100Hz とした。以上の条件を Case1 とする。

励磁コイル近傍の磁場分布解析結果を Fig.3 に示す。FG の適用により、励磁コイル軸方向（同図中の x 軸：左右方向）への磁場の広がりが抑制されるとともに、励磁コイル内部および側面（同図中の励磁コイルの上下側）の磁場が強められていることが確認できる。

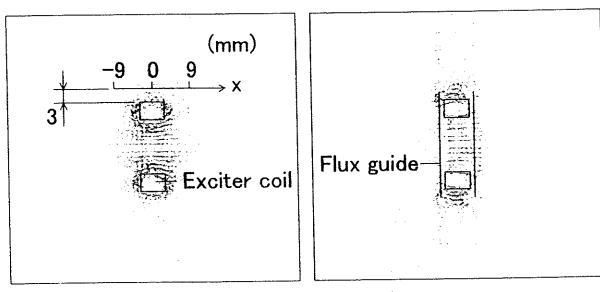


Fig.3 Calculated magnetic field distribution

励磁コイル近傍の磁束密度増加分を定量評価するために、Fig.3(a)に図示する励磁コイル側面から 3mm 離れた位置での x 軸方向磁束密度分布を Fig.4 に示す。ここで、 $x=0$  は励磁コイル中央の位置とした。FG の適用により、磁束密度分布は x 軸に対してフラットトップ形状となるとともに、その最大強度は 51% 增加する結果が得られた。以上の結果から、FG の適用が高磁束密度化に効果的であることを予測した。

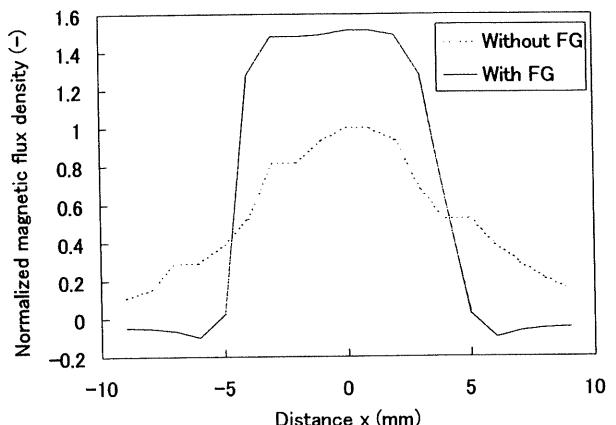


Fig.4 Calculated magnetic field density distribution

次に、FG 適用による高磁束密度化の効果を高めるために、FG 形状の最適化を行った。Fig.3(b)によると、励磁コイル両底面への FG の適用は励磁コイル内部の磁場分布を一様にする。すなわち、励磁コイル中心部分まで磁場が広がり、中心部分の強度が高くなる。励磁コイル近傍の磁束密度を高めるためには、励磁コイル中心部分への磁場の広がりを抑制し、励磁コイル近傍において閉じた磁場を形成することが好ましいと考える。したがって、FG 形状最適化のために励磁コイル内部に FG を配置することとした。また、励磁コイル軸方向への磁場の広がりを更に抑制するために、励磁コイル両底面に配置した FG の厚さを変化させることとした。

解析モデルを Fig.5 に示す。励磁コイル内部の FG は内部全体に配置した。励磁コイル両底面の FG は、励磁コイルと FG とのギャップ長を一定とし、励磁コイル軸方向外側に向かって厚さを 0.2mm、1mm、3mm、6mm と変化させた。解析での励磁周波数は Case1 と同じ 100Hz とした。以上の条件を Case2 とする。

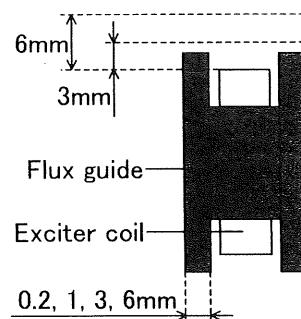


Fig.5 Analytical model

本解析では、Fig.5 に図示する励磁コイル側面から 3mm および 6mm 離れた軸上の最大磁束密度を調べた。励磁コイル両底面に配置した FG の厚さに対する最大磁束密度変化の解析結果を Fig.6 に示す。励磁コイル側面から 3mm 離れた軸上に着目すると、励磁コイル内部に FG を配置することで、最大磁束密度は、FG 無しの場合と比較して約 170% 増加することを確認し、その効果の大きいことがわかった。また、励磁コイル両底面の FG を厚くすると、最大磁束密度は飽和をともなう増加傾向を示すことを確認した。FG の厚さ変化による最大磁束密度の増加量は、例えば厚さを 3mm とした場合、FG 無しの場合と比較して約 250% 増加する結果が得られた。検査対象となる配管の肉厚が厚くなつた場合を考慮して、励磁コイル側面から 6mm 離れた軸上にも着目したが、その最大磁束密度の変化は 3mm 離れた軸上の場合と同様の傾向を示した。

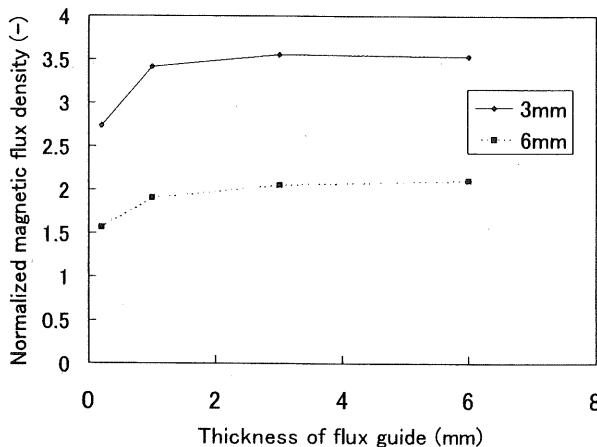


Fig.6 Calculated magnetic flux density for structural shape optimization of flux guide

#### 4. 試験方法

磁場解析にて設計・予測を行った FG による高磁束密度化の効果と高磁束密度化が RF-ECT の配管外面欠陥検出の高感度化に対する効果を検証するために試験を行つた。試験は前述の Case1 の条件で行うこととし、試験項目としては、以下に記す 3 種類を FG 有無の条件で実施した。

まず、配管外部にて励磁コイル軸方向中央部で励磁コイル側面から 3mm 離れた位置での磁束密度を測定した。

次に、励磁・検出コイルを欠陥の無い配管試験体 (Table 1) 内に挿入し、励磁コイル電流を一定とした条件下で励磁・検出コイル間距離を 12mm から 100mm まで 5mm 刻みで変化させながら検出コイルに誘導される電圧を測定した。

最後に、励磁・検出コイル間距離を一定としたプローブを、旋盤加工にて作成した人工欠陥 (Table 1) 付きの配管試験体内に挿入し、一定速度で走査させながら欠陥検出信号を測定した。

以上の 3 種類の試験は全て励磁周波数を 100Hz として行った。

Table1 Specification of specimen

Tube	Material	Carbon steel
	Outer diameter	30 mm
	Inner diameter	25 mm
	Thickness	2.5 mm
	Length	600 mm
Artificial defect	Width	1 mm
	Depth	20 % of tube thickness
	Length	2π rad of tube circumference

#### 5. 試験結果

FG の適用により励磁コイル側面の磁束密度が  $1.45 \times 10^{-3}$  T から  $2.3 \times 10^{-3}$  T に 59% 増加した。この試験結果は磁場解析による予測結果と良く一致しており、本磁場解析の妥当性と FG の適用が高磁束密度化に効果的であることが確認できた。

配管内部軸方向磁場分布の測定結果を Fig.7 に示す。励磁コイルから離れた位置（励磁・検出コイル間距離が 12mm から 45mm 程度の間）での直接磁場成分は FG の適用により低下した。これは FG がシールド板として作用したためであると考える [4][5][6]。安西らのモデル [3] をベースに考察すると、この直接磁場成分の低下は間接磁場成分を同図中規格化振幅で約  $1.4 \times 10^{-4}$  まで低下させることになる。しかし、実測値は約  $4 \times 10^{-4}$  であった。これは、励磁コイル近傍で強められた直接磁場に起因する間接磁場成分が、間接磁場全体の低下分を補足しているためであると考える。この結果から、励磁コイル近傍で強められた直接磁場が間接磁場の形成に効果的に作用しているものと考える。

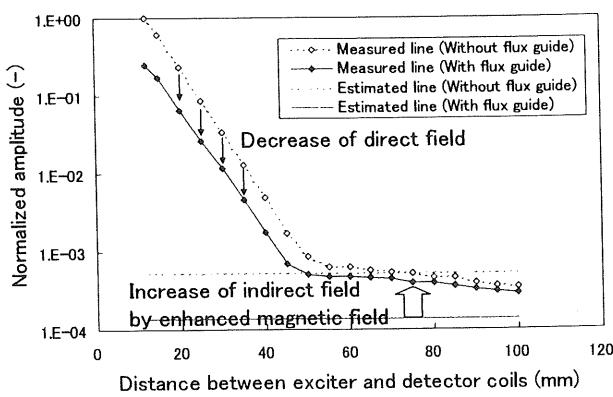


Fig.7 Measured magnetic field distribution inside tube

欠陥検出試験で得た検出信号を Fig.8 に示す。FG の適用により明確な欠陥検出信号を確認した。これにより、励磁コイル側面近傍の高磁束密度化が RF-ECT プローブの高感度化に効果的であることを検証した。

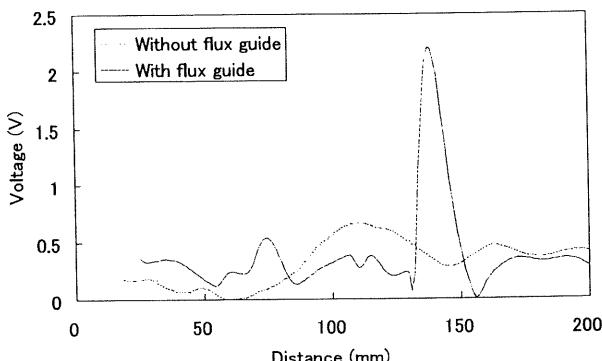


Fig.8 Measured defect detection signal

## 6. 結言

RF-ECT による配管外面欠陥検出の高感度化のために、励磁コイルに FG を適用することで磁場方向を制御して励磁コイル側面近傍の磁束密度を高める手法を考案した。磁場解析による FG の最適化設計を実施した結果、励磁コイル内部にフラックスガイドを配置し、励磁コイル両底面に配置したフラックスガイドの厚さを適切に選定することが重要であることを確認した。FG による高磁束密度化の効果と高磁束密度化による RF-ECT の配管外面欠陥検出の高感度化に対する効果を検証するために試験を行った結果、励磁コイル両底面へのフラックスガイドの適用により、励磁コイル側

面近傍の磁束密度が磁場解析での予測通り向上することを確認した。また、励磁コイル側面近傍の磁束密度向上が間接磁場の形成に効果的に作用し、RF-ECT プローブの高感度化に有効であることを検証した。

今後は探傷性能向上に向けた詳細試験を実施する。

## 参考文献

- [1] O. Mihalache, Y. Imai, M. Ueda and T. Yamashita, "Finite element simulations of the remote field eddy current signal in steam generator tubes of Monju fast breeder reactor", 2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, July 25-29, San Diego, California, Vol. PVP-484, 2004, pp. 199-205.
- [2] T. R. Schmidt, "The remote field eddy current inspection technique", Materials Evaluation, Vol. 42, No. 2, 1984, pp. 225-230.
- [3] 安西道生, 大塚祐介, 西川雅弘, "リモートフィールド領域における磁場のモデル化と欠陥検出のメカニズム", 日本AEM学会誌, Vol. 13, No. 2, 2005, pp. 163-171.
- [4] D. L. Atherton, W. Czura and T. R. Schmidt, "Finite-element calculations for shields in remote-field eddy current tools", Materials Evaluation, Vol. 47, No. 9, 1989, pp. 1084-1088.
- [5] 小山潔, 星川洋, 藤井徹, "リモートフィールド渦流試験における磁気シールドを用いた探傷プローブの検討", 非破壊検査, Vol. 45, No. 1, 1996, pp. 52-60.
- [6] 安西道生, 安岡創, 磯部倫郎, 西川雅弘, "シールド型リモートフィールド探傷プローブの検討", 日本AEM学会誌, Vol. 9, No. 3, 2001, pp. 336-342.

