

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5215303号  
(P5215303)

(45) 発行日 平成25年6月19日(2013.6.19)

(24) 登録日 平成25年3月8日(2013.3.8)

(51) Int.Cl. F I  
GO 1 N 27/90 (2006.01) GO 1 N 27/90

請求項の数 11 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2009-522243 (P2009-522243)	(73) 特許権者	509248165
(86) (22) 出願日	平成19年7月30日 (2007.7.30)		コミサリア ア レネルジ アトミック
(65) 公表番号	特表2009-545733 (P2009-545733A)		エ オエネルギー アルテルナティヴ
(43) 公表日	平成21年12月24日 (2009.12.24)		フランス国 75015 パリ リュル
(86) 国際出願番号	PCT/EP2007/057851		ブラン 25 パティマン ル ボナン
(87) 国際公開番号	W02008/015197	(74) 代理人	100147485
(87) 国際公開日	平成20年2月7日 (2008.2.7)		弁理士 杉村 憲司
審査請求日	平成22年6月23日 (2010.6.23)	(74) 代理人	100143568
(31) 優先権主張番号	0653277		弁理士 英 貢
(32) 優先日	平成18年8月3日 (2006.8.3)	(74) 代理人	100147692
(33) 優先権主張国	フランス (FR)		弁理士 下地 健一
		(72) 発明者	ジャン-マルク デントレ
			フランス国 91460 マルクーシ リ
			ユ アルフレッド デュボア 81
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 分離した放射／受信機能により導電部の渦電流検査を行う方法及びデバイス

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

分離した放射／受信巻線により、導電率  $\sigma_1$  及び比透磁率  $\mu_{r1}$  の導電部に対する渦電流検査の方法であって、電磁場を放射する少なくとも1つの放射巻線と、導電部に生じる渦電流によって発生する電磁場によって感応される少なくとも1つの受信巻線から形成される少なくとも1つのアセンブリを備えるセンサーを、当該導電部の上方を移動させて、渦電流検査を行う方法において、

当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分と前記センサーとの間の間隔を基準距離として、対応する放射巻線と受信巻線との間の間隔に依存する、受信巻線の端子間における第1の複素電圧曲線を得るステップと、

当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分と前記センサーとの間の当該基準距離とは異なる少なくとも1つの距離 (e) について、当該対応する放射巻線と受信巻線との間の間隔の関数として、受信巻線の端子間における少なくとも1つの第2の複素電圧曲線を得るステップと、

前記第1の複素電圧曲線と少なくとも1つの前記第2の複素電圧曲線との差の絶対値を最小化する、少なくとも1つの既定所定距離 (d<sub>i</sub>) を決定するステップと、

前記少なくとも1つの所定距離 (d<sub>i</sub>) の算術平均値を計算するステップと、

この算術平均値の + / - 20% を2つの放射巻線及び受信巻線間の距離として選定するステップと、

導電部に1つ以上の欠陥がある場合には該欠陥を検出するステップと、

10

20

を含むことを特徴とする方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の方法であって、当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分にて、前記導電率  $\mu_{r2}$  が、 $0.05 \times \mu_{r1}$  から  $20 \times \mu_{r1}$  であり、比透磁率  $\mu_{r2}$  が  $0.05 \times \mu_{r1}$  から  $20 \times \mu_{r1}$  であることを特徴とする方法。

【請求項 3】

少なくとも 2 つの曲線を得る前記ステップが、測定又は計算によって為されることを特徴とする、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記放射及び受信巻線が、支持部の各側に配置されることを特徴とする、請求項 1 に記載の方法。 10

【請求項 5】

前記支持部が、前記放射巻線及び受信巻線がエッチングされている可撓性を有する支持部であることを特徴とする、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

前記支持部がカプトンフィルムであることを特徴とする、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

使用する周波数の範囲が 10 ヘルツと 50 メガヘルツとの間であることを特徴とする、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

各放射巻線 / 受信巻線対における磁場回路の磁気抵抗を低減するために、磁性体を、各巻線の中心及び / 又は各巻線の近くに、検査すべき前記部分とは反対側に設置することを特徴とする、請求項 1 に記載の方法。 20

【請求項 9】

分離した放射 / 受信機能を有する、導電部に対する渦電流検査のデバイスであって、電磁場を放射する少なくとも 1 つの放射巻線と、少なくとも 1 つの受信巻線とから形成される少なくとも 1 つの素子からなる少なくとも 2 つの行であって、各行は隣の行から距離  $p$  だけオフセットされ、特定の行上の同一の特性を有する各巻線が、 $n$  を行の数として最近接の巻線から  $n \times p$  の距離である、行と、

各行における各素子の放射巻線と受信巻線との間の間隔が、 $d$  の  $+ / - 20\%$  であり、この  $d$  は、当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分と前記素子との間の間隔を基準距離とした複素電圧曲線と、当該基準距離とは異なる距離についての少なくとも 1 つの複素電圧曲線との差の絶対値を最小化する、少なくとも 1 つの所定距離 ( $d_i$ ) を計算した算術平均値である、ことを特徴とするデバイス。 30

【請求項 10】

少なくとも 2 つの行が異なる高さを有することを特徴とする、請求項 9 に記載のデバイス。

【請求項 11】

2 つの連続する行の間に電氣的絶縁体が構成されていることを特徴とする、請求項 9 に記載のデバイス。 40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、分離した放射 / 受信機能により導電部の渦電流検査を行う方法及びデバイスに関するものである。

【0002】

本発明の分野は、極めてコンパクトな一組の放射巻線及び受信巻線を使用して広い動作範囲の分離した放射 / 受信機能により導電部の渦電流検査を行う分野である。このような検査は、特に小さな欠陥の検出や導電部の非破壊検査 (NDT) に有利である。

【0003】

導電部中の欠陥を検出するために渦電流を使用する原理は、先ず、放射巻線を使用して、この導電部の材料の導電率と探索される欠陥の深さに適合させた周波数の電磁場を、この導電部付近に放出する。次のステップは、この導電部のあるところで、放射巻線と受信巻線との間の磁場の直接結合によって発生する起電力を、少なくとも1つの受信巻線の端子間で測定することである。また、導電部の材料中に欠陥がある場合に、この起電力に重畳することになる小さな変化を測定する。従って、本発明の分野は、検査すべき導電部に渦電流を発生可能にする電磁信号の放射のために設けられた少なくとも1つの巻線と、渦電流によって誘起する信号の受信のために設けられた少なくとも1つの巻線を使用する方法及びデバイスに限定され、このような構成を「分離した放射/受信機能」と呼ぶことにする。

10

## 【0004】

各受信巻線の端子間にて誘起した起電力  $V_R$  は、当該放射コイルに送られる電流の周波数と同一の周波数を有し、復調後の有用な信号を得るのに用いられる。欠陥のあるところでは、この誘起した起電力  $V_R$  は  $V_R \pm \Delta V_R$  となり、 $V_R$  に比べて極めて小さい変化  $\Delta V_R$  だけが情報を伝える。

## 【0005】

欠陥、特に小さな欠陥の検出には小さな巻線（小さな素子）の使用が必要となるので、この検出信号は著しく小さい振幅を有することになる。従来技術によるデバイスは、この問題を解決するために数個の巻線の組み合わせを有している。

## 【0006】

このように、特許文献1は、検査すべき導電部に誘起する磁場を検出するために、1つの放射巻線及び4つの検出巻線からなる、少なくとも1つの検出プローブを具える渦電流による欠陥検出デバイスを説明している。これらの受信巻線はこれらの中心位置が菱形の対角線を形成するように配置され、第1の巻線対と第2の巻線対を形成しており、この菱形の一方の対角線上に配置された第1の巻線対はコモンモードで接続され、他方の対角線上に配置された第2の巻線対はコモンモードで接続され、これらの受信巻線における第1の巻線対と第2の巻線対とは差動モードで接続されている。交流電流が入力される放射巻線は、これらの受信巻線の上方に配置され、この放射巻線の中心位置は当該菱形の中心位置の上方に配置される。この欠陥検出デバイスは、これらのプローブの各々の動作を切り替えるデバイスを具える。このように各プローブに対して、この欠陥検出デバイスは放射巻線に対して対称的に配置され、差動モードで接続された数個の受信巻線を具える。

20

30

## 【0007】

この欠陥検出デバイスは幾つかの欠点、特にその重さ、コスト、そして差動アセンブリに由来する欠点、即ち不所望な信号が、同一振幅及び同一位相で反対に接続されている2つの巻線上に同時に出現するときだけ除去できるという欠点を有する。更に関連する各巻線及びこれらの対応する測定チャンネルは、一致した特性を有していなければならない。

## 【0008】

更に、この特許文献1において、欠陥検出デバイスが検査すべき導電部の上方に移動すると、この空隙の変化、言い換えるとこの欠陥検出デバイスとこの導電部との間の高さの変化によって有益な信号を妨害しうる。これらの空隙の変化は、主に、

40

欠陥検出デバイスの移動の際の変化と、

導電部の複雑化した局所的な表面に、欠陥検出デバイスを正確に整合させることができないという事実と、  
によるものである。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0009】

【特許文献1】米国特許第6,310,476号明細書

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

50

## 【 0 0 1 0 】

本発明の目的は、分離した放射 / 受信機能により導電部の渦電流検査を行う方法及びデバイスを提案することによって、このような欠点を修正することにより、本方法及び本デバイスは空隙ノイズにあまり敏感ではなく、予期しない空隙変化に起因する有用な信号の変化を最小化する。

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 1 1 】

本発明は、分離した放射 / 受信機能により、導電率  $\sigma_1$  及び比透磁率  $\mu_{r1}$  の導電部の渦電流検査を行う方法に関するものであり、電磁場を放射する少なくとも1つの放射巻線と、この導電部にて誘起した渦電流によって生成される電磁場によって感応される少なくとも1つの受信巻線から形成される少なくとも1つのアセンブリを備えるセンサーを、当該導電部の上方を移動させて、渦電流検査を行う方法において、

例えば導電率  $\sigma_2$  が  $0.05 \times \sigma_1$  及び比透磁率  $\mu_{r2}$  が  $0.05 \times \mu_{r1}$  である当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分と前記センサーとの間の間隔を基準距離として、対応する放射巻線と受信巻線との間隔に依存する、受信巻線の端子間における第1の複素電圧曲線を得るステップと、

当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分と前記センサーとの間の当該基準距離とは異なる少なくとも1つの距離 (  $e$  ) について、当該対応する放射巻線と受信巻線との間隔の関数として、受信巻線の端子間における少なくとも1つの第2の複素電圧曲線を得るステップと、

前記第1の複素電圧曲線と少なくとも1つの前記第2の複素電圧曲線との差の絶対値を最小化する、少なくとも1つの所定距離を決定するステップと、

前記少なくとも1つの所定距離の算術平均値を計算するステップと、

この算術平均値の  $\pm 20\%$  を2つの放射巻線及び受信巻線間の距離として選定するステップと、

導電部に1つ以上の欠陥がある場合には該欠陥を検出するステップと、を含むことを特徴とする。

## 【 0 0 1 2 】

放射巻線及び受信巻線は、例えばカプトンフィルムのような可撓性を有する支持部の各側に配置され、放射巻線及び受信巻線がエッチングされていることが有利である。使用される周波数範囲を、数 Hz、例えば 10 Hz から 50 MHz までとするのが有利である。

## 【 0 0 1 3 】

放射巻線 / 受信巻線対の各々における磁性回路の磁気抵抗を低減するために、所定の磁性体を、検査すべき部分とは反対側にて、各々の巻線の中心及び / 又は各々の巻線付近に設置するのが有利である。

## 【 0 0 1 4 】

本発明による方法は、特に以下の利点を有する。

センサーの放射巻線と受信巻線との間隔を最適化して空隙の影響を最小化することができる。

三次元表面を高い空間分解能で走査することによって、数個の曲率半径からなる検査すべき導電部における種々の部分に対して、単一のセンサーを適応させることができる。

検査すべき導電部における部分に対するセンサーの度重なる走査の間に、例えばカプトンフィルムのような支持部がその表面を磨耗し、薄くなる場合にも、センサーを含む装置の設定、(特にバランス)を同一にしておくことができる。

カプトンフィルム上のセンサーが、放射巻線及び受信巻線、電源配線及びこれらのコネクタを同時にエッチングすることができ、はんだを使用しないために製造及び維持コストを低減することができる。

こうして得られたセンサーは良好な感度、良好な信号対雑音比を有し、放射巻線及び受信巻線をオーバーラップさせることによって、巻線密度を高くすることができる。

## 【 0 0 1 5 】

10

20

30

40

50

本発明による方法は多くの領域において使用でき、特に以下に適している。

原子核領域におけるスウェーピング加工の遷移のゾーン（ZTD）として、蒸気発生装置のチューブ。

航空機の分野における、複雑な導電部の部分。

【0016】

本発明はまた、導電部の渦電流検査を行うための、分離した放射/受信機能を有するデバイスに関するものであり、

例えば、支持部の各側に配置された、電磁場を放射する少なくとも1つの放射巻線と少なくとも1つの受信巻線から形成される少なくとも1つの素子からなる、例えば異なる高さの少なくとも2つの行を具え、

各行は隣の行と距離  $p$  だけオフセットされ、特定の行上の同一の性質の各巻線は、その最近接のものから  $n \times p$  ( $n$  は行数) の距離にあり、

各行における各素子の放射巻線と受信巻線との間の距離は、 $d$  の  $+/- 20\%$  に等しく、ここで  $d$  は、当該導電部の欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分と前記素子との間の間隔を基準距離とした複素電圧曲線と、当該基準距離とは異なる距離についての少なくとも1つの複素電圧曲線との差の絶対値を最小化する、少なくとも1つの所定距離 ( $d_i$ ) を計算した算術平均値である、ことを特徴とする。

【0017】

連続する2つの行の間に電気的絶縁体を設置するのが有利である。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明の方法を実装するセンサーの原理図を示している。

【図2】センサーの受信巻線の端子間にて得られた複素結合電圧を、対応する放射巻線とこの受信巻線との間の距離  $d$  の関数として示している。

【図3】図2における曲線間の結合電圧差を示している。

【図4】本発明によるプロセスを使用して得られた最適化されたセンサーの一実施例を示している。

【図5A】本発明によるデバイスの多素子構体を示している。

【図5B】本発明によるデバイスの多素子構体を示している。

【0019】

図1に示すセンサーは、支持部10の各側に設置された放射巻線11（半径  $r_1$ ）及び受信巻線12（半径  $r_2$ ）を具える。これらの巻線11及び12は、例えばカプトンの可撓性の支持部10の各側にエッチングすることができる。電流  $I$  は、放射巻線として任意に選ばれた巻線11を通過する。従って、巻線12は受信巻線となり、その端子間にて電圧  $V$  が測定される。

【0020】

これらの2つの巻線11及び12は、同一の幾何学的特性を有するのが有利である。これらの巻線の中心は距離  $d$  だけ離れている。支持部10上のこれらの巻線11及び12の全ては、検査すべき導電部13から、空隙と称する距離  $e$  に位置している。

【0021】

導電部13中の欠陥がない場合に、受信巻線12の端子間にて測定される電圧  $V$  は、2つの巻線11と12との間の電磁結合、即ち放射巻線11から放射される交流磁場の一部が、受信巻線12を通過することによるものである。この磁場は、結合電圧又は相互誘導と呼ばれる同一周波数の電圧を引き起こす。

【0022】

図2は、受信巻線12の端子間にて得られる複素結合電圧を、2つの巻線11及び12間の距離  $d$  (mm単位) の関数として以下の3つの空隙値に対して示している。即ち、

$e = 100 \mu\text{m}$  : 曲線20,

$e = 120 \mu\text{m}$  : 曲線21,

$e = 150 \mu\text{m}$  : 曲線22,

10

20

30

40

50

である。

【0023】

他のパラメータは、

巻線11及び12の外径は1mm、

巻線11及び12の内径は0.5mm、

各々が45μmの間隔及び5μmの高さを有する6巻きから形成されている巻線11及び12、

厚さ50μmの可撓性の支持部10、

動作周波数：10MHz、

である。

10

【0024】

本発明による方法は、以下のステップ、即ち、

センサーと、導電部における欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分（例えば導電率 $\mu_{r2}$ が $0.05 \times \mu_{r1}$ 、 $20 \times \mu_{r1}$ であり、比透磁率 $\mu_{r2}$ が $0.05 \times \mu_{r1}$ 、 $\mu_{r2} = 20 \times \mu_{r1}$ など）との間の間隔である基準距離、即ちセンサーが導電部に接触したときの（最小の空隙値）各巻線の部分と各巻線に最近接する部分との間の平均距離に等しい基準距離について、対応する放射巻線11と、この受信巻線との間隔の関数として、受信巻線12の端子間にて第1の複素電圧曲線を得るステップと、

当該センサーと、導電部における欠陥のない部分又は欠陥のない他の部分との間の当該基準距離とは異なる少なくとも1つの距離eにについて、対応する放射巻線とこの受信巻線との間隔の関数として、受信巻線の端子間にて、少なくとも1つの第2の複素電圧曲線21、22を得るステップと、

20

第1の曲線20と少なくとも1つの第2の曲線21、22との差の絶対値を最小化する少なくとも1つの所定距離diを決定するステップと、

所定距離diのみがあるときにdiの値に等しくなるような、少なくとも1つの所定距離diの算術平均値を計算するステップと、

この算術平均値の+/-20%を2つの放射及び受信巻線の距離として選定するステップと、

この導電部における1つ以上の欠陥の存在を検出するステップと、を含む。

30

【0025】

曲線21及び22と、基準曲線20との間の結合電圧における差が、図3の曲線30及び31に示されている。

【0026】

これらの曲線30及び31は、20μm及び50μmの2つの空隙間に対して、横軸 $d1 = 790 \mu m$ 及び $d2 = 788 \mu m$ にて最小値32を通ることが分かる。従って、これらの距離d1及びd2は、空隙における変化の影響を最小化する。従って、本発明による方法は、距離 $d = (d1 + d2) / 2 \pm 20\%$ にて、巻線11及び12を配置するステップを含む。

40

【0027】

この方法で最適化され、従って、特に複雑な表面上で雑音の少ないセンサーの一実施例が、図4に示すように説明されている。この一実施例においては、放射巻線40と各受信巻線40及び41との間の重なりが存在する。最適化された距離d1（巻線40と41との間）及びd2（巻線40と42との間）の各々は、巻線40、42又は42の半径の最小値よりも大きく、2つの対応する放射巻線及び受信巻線の半径の和よりも小さい。この実施例においては、巻線の各々はその中心に金属孔43を具える。しかし放射巻線及び/又は受信巻線は、1回巻きのみとすることもできる。この場合、金属孔43は必要ない。

【0028】

放射巻線と受信巻線41又は42との間の最適な距離dは、

50

2つの異なる支持部上に放射巻線40と受信巻線41及び42をエッチングし、異なるd及びeの値に対して結合電圧を測定することによって、

又は、各々が放射巻線40と1つ以上の受信巻線41, 42を有する一連の素子を、放射及び受信巻線間の可変距離を使用して検査することによって、実験的に見つけることができる。

【0029】

本発明による方法は、渦電流を使用して検査する非破壊検査の分野において通常使用される範囲、言い換えると、数ヘルツ例えば10ヘルツから50MHzまでの範囲内で使用されると有利である。

【0030】

本発明の方法による様々な実施例において、異なる幾何学的特性を有する放射及び受信巻線と、本発明の方法によって最適化された、放射巻線から距離dにて設置されているそれぞれ異なる複数の受信巻線と、

例えば任意の多角形又は楕円、渦巻きなどの複雑な形状の放射巻線及び受信巻線と、直列に接続された複数の巻線からなる素子の放射巻線及び受信巻線であって、例えばこれらの巻線は、カプトンフィルムの各面上に互いに向き合うようにエッチングされ金属孔を介して直列に接続された2つの同軸巻線からなり、その巻線の巻き方向は、この端子間における電圧を加算する方向にある、巻線と、

差動モードで対応する放射巻線から最近接距離に等しい距離にて接続された2つ(以上の)非同軸巻線からなる放射又は受信巻線と、各放射巻線/受信巻線対の磁性回路の磁気抵抗を低減するために、(検査すべき部分の反対側の)各巻線の中心、又は各巻線の近くにて配置された磁性材料と、

例えば直列に配置された複数の積層カプトンフィルムなどの多重巻線と、支持部上に位置する、例えば増幅器、マルチプレクサ、復号器などの電気コンポーネントと、多素子構体と、を具えるセンサーを使用できる。

【0031】

多素子構体は、機械的変位を防ぐために、例えば軸又はマトリックス構成上の機械的変位に関連したモジュールなどの、1つの基板上に構成された複数の素子を具える。このような多素子構体は、部分表面を検査するのに必要な時間を限定できる。少なくとも2つの巻線からなる素子の寸法は、2つの素子の間に必要な最大間隔pよりも大きくなることがよくあり、この間隔pは、ある部分における欠陥の位置にかかわらず、少なくとも1つの素子がある存在を検出できるように決定される。

【0032】

素子の密度を増加する第1の解決方法は、複数の行において、同一の支持部上で、全てが同一の高さにて素子をねじれ型に構成するステップを含む。このように素子の幅が必要な間隔pの2倍である場合には2行の素子を使用し、1つの行上の素子は2pの間隔にある。このような構成は、異なる行において空間的な一貫性がないことに関して、データの解釈において問題を生じさせ、マップの分析前に後処理ステップ(行の翻訳)の使用が必要になる。

【0033】

図5Aに示す第2の解決方法は、少なくとも2つの基板53及び54にて、上下に中間の絶縁層(例えばカプトンフィルム)56, 57を設置することによって、放射巻線51及び受信巻線52を具える素子50の行を積層させるステップを含み、各行は、隣の行から間隔pだけオフセットされている。「古典的な」素子、つまり放射巻線と受信巻線との間の距離が最適化されていない素子を使用することによって、受信巻線の端子間にて生じた起電力 $V_R$ は、その素子が属する層に依存して異なる。これは、特に多素子構体に対して渦電流装置のバランスを取るステップを困難にする。

10

20

30

40

50

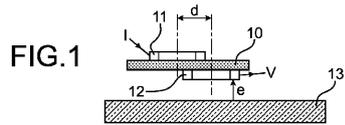
【 0 0 3 4 】

より詳細に素子を説明している図 5 B において、追加の絶縁膜 6 0 とともに、図 1 と同じ参照が使用されている。

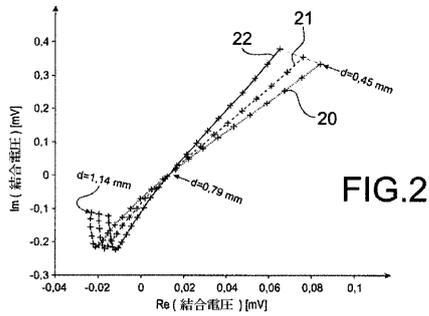
【 0 0 3 5 】

本発明による放射巻線と受信巻線との間の距離の最適化は、部分 5 8 と素子との間の距離にかかわらず、生じた起電力  $V_R$  の値が同一である素子をもたらす。従って、この構成をより詳細には本発明による距離の最適化方法に適用する。

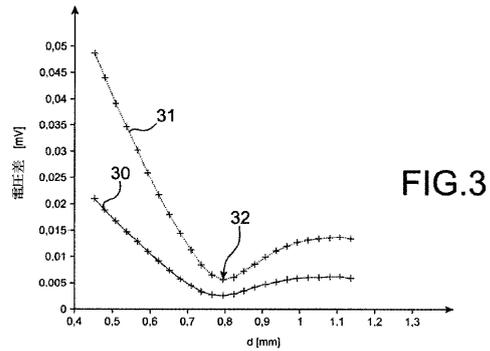
【 図 1 】



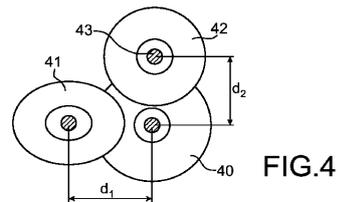
【 図 2 】



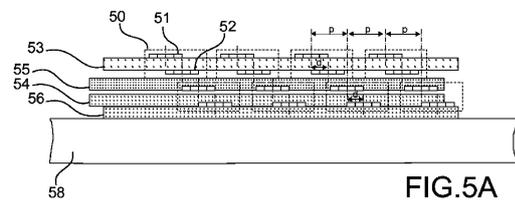
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 A 】



【 5 B 】

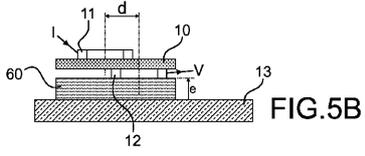


FIG.5B

---

フロントページの続き

審査官 中村 祐一

(56)参考文献 特表2005-518534(JP,A)  
特開2000-193783(JP,A)  
特開2000-337809(JP,A)  
特開平10-111279(JP,A)  
特開平10-078336(JP,A)  
特開昭63-139202(JP,A)  
特開昭57-053604(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G01N27/72 - 27/90