

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公 開 特 許 公 報(A)

(11)特許出願公開番号
特開2025-104728
(P2025-104728A)

(43)公開日
令和7年7月10日(2025. 7. 10)

(51)Int. Cl.
G 0 1 N 29/24 (2006. 01)
H 0 4 R 1/02 (2006. 01)

F I
G 0 1 N 29/24
H 0 4 R 1/02 3 3 0

テーマコード (参考)
2 G 0 4 7
5 D 0 1 9

		審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 14 頁)	
(21)出願番号	特願2023-222742(P2023-222742)	(71)出願人	505374783
(22)出願日	令和5年12月28日(2023. 12. 28)		国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 茨城県那珂郡東海村大字舟石川 7 6 5 番地 1
		(71)出願人	000198318
			株式会社 I H I 検査計測 東京都品川区南大井六丁目 2 5 番 3 号
		(74)代理人	110000442
			弁理士法人武和国際特許事務所
		(72)発明者	阿部 雄太
			茨城県那珂郡東海村大字舟石川 7 6 5 番地 1 号 国立研究開発法人日本原子力研究開 発機構内
		最終頁に続く	

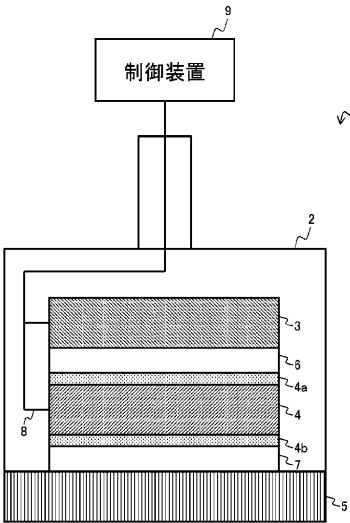
(54)【発明の名称】超音波探触子及び超音波探触子の製造方法

(57)【要約】

【課題】高温環境下で使用可能な超音波探触子を提供する。

【解決手段】超音波探触子は、電極と、電極に電圧が印加された場合に超音波を発信し、超音波の反射波を電気信号に変換して出力する振動子と、被検査物と接触する保護部材とを備える。振動子の厚み方向の両面には、融解メタライズ層が形成されている。超音波探触子は、融解メタライズ層を介して電極及び振動子を接合する第1接合部材と、融解メタライズ層を介して振動子及び保護部材を接合する第2接合部材とをさらに備える。第1接合部材及び第2接合部材は、A 1 より融点の高い材料で形成されている。

【選択図】図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電極と、

前記電極に電圧が印加された場合に超音波を発信し、超音波の反射波を電気信号に変換して出力する振動子と、

被検査物と接触する保護部材とを備える超音波探触子において、

前記振動子の厚み方向の両面には、融解メタライズ層が形成され、

前記融解メタライズ層を介して前記電極及び前記振動子を接合する第 1 接合部材と、

前記融解メタライズ層を介して前記振動子及び前記保護部材を接合する第 2 接合部材とをさらに備え、

10

前記第 1 接合部材及び前記第 2 接合部材は、A l より融点の高い材料で形成されていることを特徴とする超音波探触子。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

前記第 1 接合部材及び前記第 2 接合部材は、A g、N i、T i、Z r、A u、C u のうちの少なくとも 1 種類の元素を含む材料で形成されていることを特徴とする超音波探触子。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の超音波探触子において、

前記振動子は、L i N b O₃ で形成され、

20

前記保護部材は、W、T a、M o、N b のうちの少なくとも 1 種類の元素を含む材料で形成されていることを特徴とする超音波探触子。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の超音波探触子において、

前記保護部材は、N b を含む材料で形成され、

前記電極は、T i を含む材料で形成され、

前記第 1 接合部材及び前記第 2 接合部材は、Z r を含む材料で形成されていることを特徴とする超音波探触子。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

30

前記第 2 接合部材は、音響インピーダンスが前記振動子以上で且つ前記保護部材以下の材料で形成されていることを特徴とする超音波探触子。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の超音波探触子の製造方法において、

前記電極、前記第 1 接合部材となる金属ろう材、前記融解メタライズ層となる金属粉末、前記振動子、前記融解メタライズ層となる金属粉末、前記第 2 接合部材となる金属ろう材、及び前記保護部材を、この順で積層して積層構造体を形成し、

真空炉内において、前記金属ろう材及び前記金属粉末の融点以上の温度で、前記積層構造体を加熱することを特徴とする超音波探触子の製造方法。

【請求項 7】

40

請求項 6 に記載の超音波探触子の製造方法において、

前記積層構造体を、積層方向への熱膨張を制限し且つ前記積層方向に直交する方向への熱膨張を許容する治具で拘束して、前記真空炉内で加熱することを特徴とする超音波探触子の製造方法。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の超音波探触子の製造方法において、

前記治具は、

前記積層構造体を囲む位置で各々が前記積層方向に延設された複数のネジと、

前記積層構造体の前記積層方向の両側で複数の前記ネジに挿通される一対の挟持プレートと、

50

前記電極及び一方の前記挟持プレートの間、及び前記保護部材及び他方の前記挟持プレートの間に配置される一対のセラミックプレートと、

複数の前記ネジそれぞれに螺合される複数のナットとを備え、

複数の前記ナットで前記挟持プレートを押圧することによって、一対の前記挟持プレートによる前記積層構造体の拘束力を調整することを特徴とする超音波探触子の製造方法。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の超音波探触子の製造方法において、

一対の前記セラミックプレートは、前記積層方向の厚み寸法が互いに異なることを特徴とする超音波探触子の製造方法。

【請求項 10】

請求項 8 に記載の超音波探触子の製造方法において、

前記挟持プレート及び前記ナットの間にはバネ座金を介在させて、前記拘束力を調整することを特徴とする超音波探触子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、高温環境下で使用可能な超音波探触子及びその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、圧電振動子から被検査物に超音波を発信し、反射波が戻ってくるまでの時間によって、被検査物の内部状態を検出する超音波探触子が知られている。このような超音波探触子は、例えば、電極と、超音波を送受信する圧電振動子と、圧電振動子及び被検査物の間に介在する保護シユーとを積層して構成されるのが一般的である。

【0003】

また、近年では、高温環境下で使用可能な超音波探触子として、キュリー点の高いニオブ酸リチウム (LiNbO_3) で圧電振動子を構成したものがある (例えば、特許文献 1 ～ 3 を参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】 特開 2001-48668 号公報

【特許文献 2】 特開 2003-4713 号公報

【特許文献 3】 特開平 10-153586 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、超音波探触子を高温環境下で使用するためには、圧電素子の耐熱性のみならず、セラミック製の圧電振動子と、金属製の電極及び保護シユーとを強固に接合することが必要である。しかしながら、特許文献 1 ～ 3 の構成では、特に冷却材として液体ナトリウムを使用する高速炉などにおいて、セラミックと金属との接合強度が十分とは言えない。

【0006】

本発明は、このような従来技術の課題を解決するためになされたものであり、その目的は、高温環境下で使用可能な超音波探触子を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明は、前記課題を解決するため、電極と、前記電極に電圧が印加された場合に超音波を発信し、超音波の反射波を電気信号に変換して出力する振動子と、被検査物と接触する保護部材とを備える超音波探触子において、前記振動子の厚み方向の両面には、融解メタライズ層が形成され、前記融解メタライズ層を介して前記電極及び前記振動子を接合す

10

20

30

40

50

る第1接合部材と、前記融解メタライズ層を介して前記振動子及び前記保護部材を接合する第2接合部材とをさらに備え、前記第1接合部材及び前記第2接合部材は、A1より融点の高い材料で形成されていることを特徴とする。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、高温環境下で使用可能な超音波探触子を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本実施形態に係る超音波探触子の断面模式図である。

【図2】振動子(A)、保護シュー(B)、接合部材(C)を構成し得る材料の候補及びその物性を示す表である。

10

【図3】本実施形態に係る超音波探触子の製造プロセスを示す図である。

【図4】超音波探触子となる積層構造体を拘束する治具の模式図である。

【図5】セラミックプレート及びバネ座金の有無、保護シューの材料を変更した場合の接合結果を示す表である。

【図6】比較例1、2及び実施例1、2の構成及び接合面の状態を示す表である。

【図7】比較例1における電極及び振動子の接合面(A)、振動子及び保護シューの接合面(B)を超音波探傷した結果を示す図である。

【図8】比較例2における電極及び振動子の接合面(A)、振動子及び保護シューの接合面(B)を超音波探傷した結果を示す図である。

20

【図9】実施例1における電極及び振動子の接合面(A)、振動子及び保護シューの接合面(B)を超音波探傷した結果を示す図である。

【図10】実施例2における電極及び振動子の接合面(A)、振動子及び保護シューの接合面(B)を超音波探傷した結果を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、図面を参照して、実施形態に係る超音波探触子1を説明する。なお、以下に記載する本発明の実施形態は、本発明を具体化する際の一例を示すものであって、本発明の範囲を実施形態の記載の範囲に限定するものではない。従って、本発明は、実施形態に種々の変更を加えて実施することができる。

30

【0011】

〔超音波探触子1の構造〕

超音波探触子1は、被検査物に対して超音波を発信し、発信した超音波の反射波に基づいて、被検査物の内部の状態を検出するセンサである。このように、超音波探触子1は、被検査物を破壊することなく内部の状態を把握することができるので、例えば、配管の内部を通過する流体の状態を検出するセンサとして用いることができる。超音波探触子1は、例えば、高速増殖炉において、原子炉の冷却材となる液体ナトリウムが通過する配管に取り付けられて、配管を通過する液体ナトリウムの状態(例えば、流速、流量、温度)を計測するのに用いられる。このような用途に用いられる超音波探触子1は、シビアアクシデントを想定して、850℃以上の高温環境化で適切に動作することが求められる。但し、超音波探触子1の用途は、これに限定されない。

40

【0012】

図1は、本実施形態に係る超音波探触子1の断面模式図である。図2は、振動子4(A)、保護シュー5(B)、接合部材6、7(C)を構成し得る材料の候補及びその物性を示す表である。図1に示すように、超音波探触子1は、筐体2と、電極3と、振動子4と、保護シュー5(保護部材)と、接合部材6、7と、信号線8とを主に備える。なお、図1では、各部材の積層構造を明らかにするために、各部材を厚く描いているが、実際の厚みとは異なる。

【0013】

筐体2は、超音波探触子1の構成部品3～8を収容する箱形の部材である。また、筐体

50

2の一面（図1の下面）は、開口している。そして、筐体2は、保護シュー5の被検査物との接触面を、開口面を通じて外部に露出させる。さらに、電極3、接合部材6、振動子4、接合部材7、及び保護シュー5は、筐体2の内部でこの順に積層されている。

【0014】

電極3は、信号線8によって制御装置9に接続される金属の平板（円板）である。電極3は、例えば、Ptで形成される。但し、電極3を構成する材料は、融解メタライズ法を採用することから、振動子4の端面が金属化するため、前述の例に限定されず、Ti、Mo、Cr、Ta、W等の採用も可能となるが、高温時の酸化防止の理由からPtが最も望ましい。

【0015】

振動子4は、電圧が印加されることによって超音波を発信し、超音波（発信した超音波の反射波）を受信することによって電圧を発生させるものである。振動子4は、例えば、セラミックで構成される平板（円板）状の部材である。振動子4は、例えば図2（A）に示すように、 LiNbO_3 で形成される。但し、振動子4を構成する材料は、性能を維持できる使用限界温度を満たす材料であればよいため、前述の例に限定されず、 AlN 、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、 GaPO 、 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 等でもよく、適宜選択すればよい。

【0016】

振動子4の厚み方向の両面（図1の上下面）には、融解メタライズ層4a、4bが形成されている。融解メタライズ層4a、4bは、融解メタライズ法によってセラミックの表面に形成された金属皮膜である。融解メタライズ層4a、4bは、振動子4の表面に金属粉末を塗布して加熱することによって形成される。融解メタライズ層4a、4bを構成する材料としては、例えば、Tiを含む金属（合金）が挙げられる。但し、融解メタライズ層4a、4bを構成する材料は、前述の例に限定されず、Zrでもよく、音響インピーダンスが、振動子4＞金属ろう材＞保護シュー5を満たす組み合わせが最も望ましい。

【0017】

保護シュー5は、振動子4と被検査物との間に介在する金属の平板（円板）である。保護シュー5は、例えば図2（B）に示すように、W、Ta、Mo、Nbのうちの少なくとも1種類の元素を含む材料で形成される。保護シュー5に求められる性質としては、融点が振動子4の使用限界温度より十分に高いことが挙げられる。また、保護シュー5に求められる性質としては、音響インピーダンスが振動子4に近いことが挙げられる（すなわち、Nbが最も望ましい）。図2（B）には、振動子4より音響インピーダンスが高い元素を列挙しているが、振動子4及び保護シュー5の音響インピーダンスの大小関係は、特に限定されない。

【0018】

接合部材6、7は、金属同士を接合する、所謂「金属ろう」である。接合部材6（第1接合部材）は、融解メタライズ層4aを介して電極3及び振動子4を接合する。また、接合部材7（第2接合部材）は、融解メタライズ層4bを介して振動子4及び保護シュー5を接合する。接合部材6、7は、Ag、Ni、Ti、Zr、Au、Cuのうちの少なくとも1種類の元素を含む材料で形成されている。すなわち、接合部材6、7は、Alより融点の高い材料で形成されている。なお、接合部材6、7は、同一の材料で構成されていてもよいし、異なる材料で構成されていてもよい。

【0019】

保護シュー5を構成する材料（図2（B））と、接合部材6、7を構成する材料（図2（C））とは、任意の組み合わせが可能である。但し、振動子4及び保護シュー5を接合する接合部材7は、音響インピーダンスが振動子4及び保護シュー5の間（より詳細には、振動子4以上で且つ保護シュー5以下）の材料で形成されるのが望ましい。一例として、保護シュー5を構成する材料にW、Ta、Moのいずれかを選択する場合、接合部材7を構成する材料にAg、Ni、Ti、Zr、Au、Cuを選択するのが望ましい。他の例として、保護シュー5を構成する材料にNbを選択する場合、接合部材7を構成する材料

に T_i 、 Z_r を選択するのが望ましい。

【0020】

信号線 8 は、電極 3 及び振動子 4 と制御装置 9 とを接続する。制御装置 9 は、商用電源またはバッテリーの電力を用いて、電極 3 に電圧（高周波のパルス電圧）を印加する。これにより、電極 3 及び振動子 4 の間に電位差が生じて、振動子 4 が超音波を発信する。また、振動子 4 が発信した超音波は、保護シュー 5 を通じて被検査物に伝搬し、反射波となって振動子 4 に戻ってくる。さらに、振動子 4 は、受信した反射波を電気信号（電圧）に変換して、信号線 8 を通じて制御装置 9 に出力する。そして、制御装置 9 は、振動子 4 から受信した電気信号に基づいて、被検査物の内部の状態を特定する。超音波探触子 1 の具体的な動作は、従来と同様である。

10

【0021】

〔超音波探触子 1 の製造方法〕

図 3 は、本実施形態に係る超音波探触子 1 の製造プロセスを示す図である。図 4 は、超音波探触子 1 となる積層構造体 10 を拘束する治具 11 の模式図である。

【0022】

まず、電極 3、振動子 4、保護シュー 5、及び接合部材 6、7 となる金属ろう材を、所定の形状に成形する（S1）。次に、電極 3、接合部材 6 となる金属ろう材、融解メタライズ層 4a となる金属粉末、振動子 4、融解メタライズ層 4b となる金属粉末、接合部材 7 となる金属ろう材、及び保護シュー 5 を、この順に積層して、積層構造体 10 を形成する（S2）。次に、図 4 に示すように、積層構造体 10 を治具 11 で拘束する（S3）。

20

【0023】

治具 11 は、積層方向への熱膨張を制限し且つ積層方向に直交する方向への熱膨張を許容するように、積層構造体 10 を拘束するものである。ここで、「積層方向への熱変形を制限する」とは、熱変形を完全に阻止することを意味せず、微小な範囲（例えば、後述するバネ座金 16a、16b の弾性の範囲）で熱変形を許容することを意味してよい。治具 11 は、例えば、複数のネジ 12a、12b と、一对の挟持プレート 13a、13b と、一对のセラミックプレート 14a、14b と、複数のナット 15a、15b、15c、15d、15e、15f と、複数のバネ座金 16a、16b とを備える。

【0024】

ネジ 12a、12b は、積層構造体 10 を囲む位置において、各々が積層方向（上下方向）に延設されている。図 4 では 2 本のネジ 12a、12b を図示しているが、4 本のネジで積層構造体 10 を囲んでいてもよい。

30

【0025】

挟持プレート 13a、13b は、金属製の平板である。挟持プレート 13a、13b には、ネジ 12a、12b が挿通される貫通孔が形成されている。そして、挟持プレート 13a、13b は、積層構造体 10 の積層方向の両側に配置されて、貫通孔にネジ 12a、12b が挿通されている。そして、挟持プレート 13a、13b は、積層構造体 10 を積層方向の両側から挟持して、積層構造体 10 を拘束（構成部品を位置決め）する。

【0026】

セラミックプレート 14a、14b は、例えば、アルミナ（ AlO_3 ）で形成されたセラミックの平板である。セラミックプレート 14a、14b は、積層構造体 10 と挟持プレート 13a、13b との間に配置される。より詳細には、セラミックプレート 14a は、電極 3 及び挟持プレート 13a の間に配置される。セラミックプレート 14b は、保護シュー 5 及び挟持プレート 13b の間に配置される。なお、セラミックプレート 14a、14b は、セラミック製の振動子 4 と比較して線膨張係数の大きい電極 3 及び保護シュー 5 の熱変形（膨張、収縮）を吸収するために配置される。また、セラミックプレート 14a、14b は、電極 3 及び保護シュー 5 より熱伝達率の低い材料で構成される。さらに、セラミックプレート 14a、14b は、電極 3 及び保護シュー 5 とくつつくのを防止するために、表面粗さを粗く（例えば、荒仕上げ（ $R_a: 25 \mu m$ ）～並仕上げ（ $R_a: 6.3 \mu m$ ）以上の粗さに）するのが望ましい。

40

50

【0027】

セラミックプレート14a、14bの厚み寸法は、互いに異なってもよい。より詳細には、セラミックプレート14a、14bに接する積層構造体10の構成部品（すなわち、電極3及び保護シュー5）の厚み寸法が大きいほど、セラミックプレート14a、14bの厚み寸法を大きくする。また、セラミックプレート14a、14bに接する積層構造体10の構成部品（すなわち、電極3及び保護シュー5）の線膨張係数が大きいほど、セラミックプレート14a、14bの厚み寸法を大きくする。本実施形態では、保護シュー5に接するセラミックプレート14bの厚み寸法を、電極3に接するセラミックプレート14aより大きくしている。

【0028】

ナット15a～15fは、ネジ12a、12bに螺合されている。ナット15a～15fは、挟持プレート13a、13bを位置決めすると共に、挟持プレート13a、13bによる積層構造体10の拘束力を調整する。より詳細には、ナット15a、15b、15c、15dは、挟持プレート13bを積層方向から挟むようにネジ12a、12bに螺合されて、挟持プレート13bを位置決め固定する。ナット15e、15fは、挟持プレート13aの上方でネジ12a、12bに螺合されて、積層構造体10の構成部品がズレない程度の拘束力になるように、挟持プレート13aを下向きに押圧する。

【0029】

バネ座金16a、16bは、ワッシャの周方向の一部が切断され、一对の切断面が厚み方向にズレたものである。バネ座金16a、16bを構成する材料としては、例えば、Cu、Ni、SUSなどが挙げられる。バネ座金16a、16bは、挟持プレート13a及びナット15e、15fの間において、ネジ12a、12bに挿通されている。バネ座金16a、16bは、後述する積層構造体10の加熱（S4）によって、積層構造体10が熱膨張するのに伴う挟持プレート13a、13bの拘束力を調整する役割を担う。より詳細には、バネ座金16a、16bは、積層構造体10の熱膨張に伴って、挟持プレート13a、13bの拘束力を弱めて、積層構造体10が過度に圧縮されるのを防止する。

【0030】

図4に示すように、積層構造体10を治具11で拘束することによって、積層構造体10の積層方向の熱膨張は、バネ座金16a、16bの弾性の範囲に制限される。なお、挟持プレート13a、13bによる拘束力は、積層構造体10の構成部品の位置ズレを防止できる程度の弱い力でよい。一方、治具11は、積層構造体10を積層方向に直交する方向（図4の水平方向）に拘束していないので、積層構造体10の水平方向の熱膨張は許容される。

【0031】

次に、治具11によって拘束された積層構造体10を真空炉（図示省略）に収容し、接合対象に合わせた所定温度（750℃～1,000℃）で加熱速度が約8℃/min～10℃/min以下の範囲で3時間から5時間程度加熱した後、真空炉内で自然冷却する（S4）。これにより、金属粉末が融解して振動子4の両面に融解メタライズ層4a、4bが形成されると共に、金属ろう材が溶融して電極3、振動子4、保護シュー5が接合部材6、7によって接合される。さらに、電極3及び振動子4と制御装置9とを信号線8で接続し、筐体2に収容することによって、超音波探触子1が完成する（S5）。

【0032】

なお、所定温度は、振動子4の材料によって変動する。例えば、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 及び GaPO なら750℃、 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ なら800℃～900℃以下、 AlN 及び LiNbO_3 なら1,000℃（本実施形態では、850℃）以下に設定される。また、上記加熱速度は作業効率の観点から約8℃/min～約10℃/minの範囲が好ましいが、10℃/minの加熱速度を超過した場合、急激な温度変化によって振動子4が割れる等の接合不備が起こるおそれがある。

【0033】

真空炉内部の真空度は、積層構造体10を構成する材料によって適宜選択される。例え

10

20

30

40

50

ば、保護シュー 5 に Nb を採用した場合は、酸化を防ぐために高い真空度に設定するのが望ましい。また、加熱温度（所定温度）は、融解メタライズ層 4 a、4 b となる金属粉末及び接合部材 6、7 となる金属ろう材の融点以上の温度となる。例えば、金属粉末に Ti を採用し、金属ろう材に Ag を採用した場合は、850℃程度となる。さらに、加熱時間（所定時間）は、金属ろう材の厚み寸法などによって適宜選択される。

【0034】

〔治具 11 の考察〕

図 5 は、セラミックプレート 14 a、14 b 及びバネ座金 16 a、16 b の有無、保護シュー 5 の材料を変更した場合の接合結果を示す表である。なお、図 5 のセラミックプレート 14 a、14 b 及びバネ座金 16 a、16 b の欄において、×印は当該部材を省略したことを示し、○印は当該部材を使用したことを示す。また、図 5 の接合結果の欄において、×印は接合できなかったことを示し、△印は従来と同程度に接合できたことを示し、○印は従来より高品質（高強度）に接合できたことを示す。

【0035】

パターン A ～ パターン D に示すように、セラミックプレート 14 a、14 b 及びバネ座金 16 a、16 b のいずれかを省略すると、適切に接合することができなかった。より詳細には、振動子 4 が割れる、電極 3 及び保護シュー 5 と挟持プレート 13 a、13 b とがくつつく等の不具合が発生した。このことからセラミックプレート 14 a、14 b の表面粗さが粗い方が望ましいことが分かった。セラミックプレート 14 a、14 b の表面粗さは、荒仕上げ（Ra：25 μm）～並仕上げ（Ra：6.3 μm）以上の粗さが望ましい。

【0036】

但し、バネ座金 16 a、16 b を使用すると（パターン B）、振動子 4 が割れる頻度は減少した。特に、モース硬度の低い材料（SUS > Ni > Cu）のバネ座金 16 a、16 b を採用するほど、振動子 4 が割れる頻度が減少した。すなわち、積層構造体 10 が加熱される過程で、バネ座金 16 a、16 b の弾性によって、電極 3 及び保護シュー 5 の熱膨張が吸収されると考えられる。このことからバネ座金 16 a、16 b のモース硬度が重要であることが分かり、Cu が望ましいことが分かった。

【0037】

また、セラミックプレート 14 a を使用すると（パターン C）、電極 3 及び保護シュー 5 と挟持プレート 13 a、13 b とのくつつきを防止できた。さらに、セラミックプレート 14 a、14 b の両方を使用し（パターン D）、セラミックプレート 14 a、14 b の厚み寸法（薄、中、厚）の組み合わせを変更したところ、セラミックプレート 14 b をセラミックプレート 14 a より厚くした場合に、振動子 4 の割れが最も少なかった。すなわち、熱伝達率の低いセラミックプレート 14 a、14 b を電極 3 及び保護シュー 5 に接触させることによって、冷却時に電極 3 及び保護シュー 5 の温度が急激に下がるのを防止できるものと考えられる。なお、セラミックプレート 14 a、14 b の厚みは、例えば、電極 3 及び保護シュー 5 の厚みや熱膨張率の比率に合わせて設定すればよい。

【0038】

一方、パターン E ～ F に示すように、セラミックプレート 14 a、14 b 及び Cu 製のバネ座金 16 a、16 b の全てを使用すると、振動子 4 の頻度が極めて少なくなって、電極 3、振動子 4、保護シュー 5 が接合部材 6、7 を介して適切に接合された。なお、振動子 4 には、Ti 製の保護シュー 5 を採用した場合（パターン E）には従来と同程度の割れが発生したのに対して、Ti より熱膨張率の低い Nb 製の保護シュー 5 を採用した場合（パターン F）には割れが確認されなかった。すなわち、熱膨張率の低い材料（換言すれば、線膨張係数が振動子 4 に近い材料）で保護シュー 5 を形成することによって、振動子 4 の割れを有効に防止できることが確認された。

【0039】

〔従来の製造方法（ホットスタンプ）との比較〕

積層構造体 10 を接合する従来の方法として、所謂「ホットプレス」がある。ホットプ

レスは、積層構造体 10 を積層方向から所定の力（治具 11 による拘束力より大きな力）でプレスした状態で、Ar 環境化で加熱する方法である。ホットスタンプで積層構造体 10 を接合する際には、振動子 4 に割れが発生しやすく、振動子 4 の厚み寸法に制限（例えば、1 mm～2 mm 程度）があった。これに対して、本実施形態に係る治具 11 では、積層構造体 10 の構成部品の位置ズレを防止する程度の弱い力で拘束するだけなので、振動子 4 の厚み寸法を大きく変更しても、割れを生じることなく、適切に接合することが可能になる。

【0040】

ここで、振動子 4 が発生させる超音波の周波数は、振動子 4 の厚み寸法に依存する。より詳細には、厚み寸法が小さいほど高周波の超音波を発生させ、厚み寸法が大きいほど低周波の超音波を発生させる。そこで、本実施形態に係る振動子 4 の厚み寸法は、例えば以下のように、超音波探触子 1 の用途に合わせて、0.1 mm～30 mm の範囲で選択すればよい。

【0041】

一例として、超音波探触子 1 を配管の損傷検査に用いる場合、振動子 4 の厚み寸法を 0.1 mm～0.5 mm（より好ましくは、0.1 mm～0.2 mm）として、3.3 MHz～6.6 MHz（より好ましくは、3.3 MHz～16.5 MHz）の超音波を発生させればよい。他の例として、超音波探触子 1 を配管内の流体の流速計測に用いる場合、振動子 4 の厚み寸法を 1 mm～2 mm として、3.3 MHz～16.5 MHz の超音波を発生させればよい。さらに他の例として、超音波探触子 1 を配管内の破裂音の検出に用いる（すなわち、AE（Acoustic Emission）センサとして用いる）場合、振動子 4 の厚み寸法を 5 mm～30 mm（より好ましくは、10 mm～30 mm）として、0.66 MHz～0.11 MHz（より好ましくは、0.33 MHz～0.11 MHz）の超音波を発生させればよい。

【0042】

[接合面の状態の考察]

図 6 は、比較例 1、2 及び実施例 1、2 の構成及び接合面の状態を示す表である。図 7 は、比較例 1 における電極 3 及び振動子 4 の接合面（A）、振動子 4 及び保護シュー 5 の接合面（B）を超音波探傷した結果を示す図である。図 8 は、比較例 2 における電極 3 及び振動子 4 の接合面（A）、振動子 4 及び保護シュー 5 の接合面（B）を超音波探傷した結果を示す図である。図 9 は、実施例 1 における電極 3 及び振動子 4 の接合面（A）、振動子 4 及び保護シュー 5 の接合面（B）を超音波探傷した結果を示す図である。図 10 は、実施例 2 における電極 3 及び振動子 4 の接合面（A）、振動子 4 及び保護シュー 5 の接合面（B）を超音波探傷した結果を示す図である。

【0043】

図 7～図 10 では、接合面の不均一さが色の変化として表されている。図 7 は、動作温度が 500℃ 程度の従来（比較例 1）の接合面の状態である。この接合面の状態が基準となる。図 8 は、接合方法に活性 Ag ろうを採用し、加熱温度を 850℃ とした場合（比較例 2）の接合面の状態である。図 8 に示すように、接合方法に活性 Ag ろうを採用して加熱温度を上昇させると、図 7 と比較して接合面の不均一さが増している。

【0044】

図 9 は、接合方法に融解メタライズ法及び Ag ろうを採用し、加熱温度を 850℃ とした場合（実施例 1）の接合面の状態である。図 10 は、実施例 1 の Ti に代えて、保護シュー 5 に Nb を採用した場合（実施例 2）の接合面の状態である。なお、図 9 及び図 10 は、図 7 及び図 8 と比較して、解像度を高めて撮影している。図 9 及び図 10 に示す接合面の状態は、800℃ 以上の環境で使用する際にも十分な均一さを有している。

【0045】

そして、保護シュー 5 に Nb を採用した場合（図 10）は、保護シュー 5 に Ti を採用した場合（図 9）と比較して、接合面の状態がさらに均一であることが確認できる。そして、接合面が均一であることは、電極 3 及び振動子 4、振動子 4 及び保護シュー 5 が強固

に接合されていることを指している。

【0046】

〔動作確認〕

比較例1及び実施例2に係る超音波探触子を、室温、200℃、400℃の環境下で使用した。その結果、比較例1及び実施例2に係る超音波探触子は、どの環境下でも同様の電気信号を出力することが確認された。すなわち、実施例2に係る超音波探触子は、図3のS4で850℃に加熱されても、その機能を喪失していないことが確認された。

【0047】

〔本実施形態の作用効果〕

上記の実施形態によれば、接合部材6、7をA1より融点の高い材料で形成することによって、超音波探触子1の動作可能温度を高くすることができる。また、セラミック製の振動子と、金属製の電極3及び保護シュー5とを、融解メタライズ層4a、4b及び接合部材6、7を介して接合することによって、接合面を均一（すなわち、強固）にすることができる。その結果、高温環境下で使用可能な超音波探触子1を得ることができる。

【0048】

特に、保護シュー5の材料には、接合結果が最も良好な（すなわち、接合強度が最も高い）Nbを採用するのが望ましい。そして、振動子4にLiNbO₃を採用した場合、音響インピーダンスが振動子4以上で且つ保護シュー5以下のTi、Zrで、接合部材7を形成するのが望ましい。振動子4、接合部材7、保護シュー5の音響インピーダンスの大小関係を前述のようにすることによって、超音波探触子1の検出精度を向上させることができる。これは、隣接する部材（すなわち、振動子4と接合部材7、接合部材7と保護シュー5）の境界面における超音波の反射及び透過の性質による。より詳細には、隣接する部材の音響インピーダンスの差が大きいと、境界面での反射率が向上し、透過率が低下して、その結果として検出精度が低下する。一方、隣接する部材の音響インピーダンスの差が小さいと、境界面での反射率が低下し、透過率が向上して、その結果として検出精度が向上する。これは、スネルの法則によって説明できる。

【0049】

また、上記の製造方法によれば、積層構造体10を真空炉内で加熱することによって、保護シュー5の材料にNbを選択した場合でも、製造過程で保護シュー5が酸化するのを防止できる。さらに、上記の製造方法によれば、融解メタライズ層4a、4bの形成と、接合部材6、7による電極3、振動子4、保護シュー5の接合とを同時に行うことができる。その結果、超音波探触子1の製造工程を簡素化することができる。

【0050】

また、上記の製造方法によれば、積層構造体10を積層方向にのみ拘束する治具11を用いて加熱するので、熱膨張による水平方向の変形を許容しつつ、積層構造体10を構成する各部品の位置ズレを防止することができる。また、電極3及び保護シュー5と挟持プレート13a、13bとの間にセラミックプレート14a、14bを介在させることによって、電極3及び保護シュー5と挟持プレート13a、13bとがくっついたり、振動子4が割れるのを防止できる。さらに、挟持プレート13aとナット15e、15fとの間にバネ座金16a、16bを介在させることによって、電極3及び保護シュー5の熱膨張による振動子4の割れを防止できる。

【0051】

また、超音波探触子1によれば、原子炉の冷却材となる液体ナトリウムが通過する配管に取り付けられて、配管を通過する液体ナトリウムの状態（例えば、流速、流量、温度）を計測するのに用いることができるだけでなく、宇宙船や航空機における燃焼試験といった高温環境下における流体解析への応用も期待できる。さらに、化学プラントや火力発電などの探傷試験やモニタリングに必要な10MHzを超える高周波を提供できると共に、AEセンサのように破断音等のモニタリングに必要な1MHz以下の低周波を提供することもできる。

〔符号の説明〕

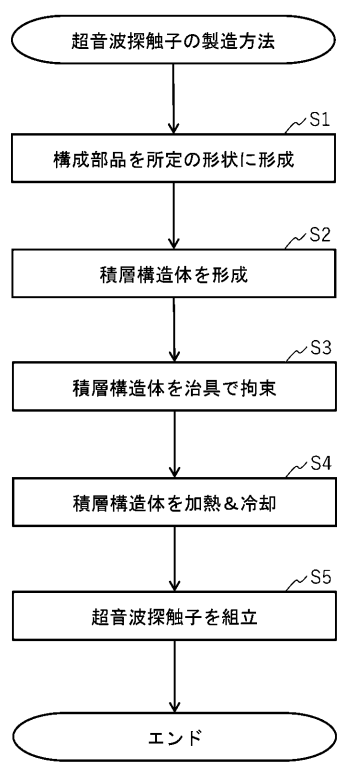
10

20

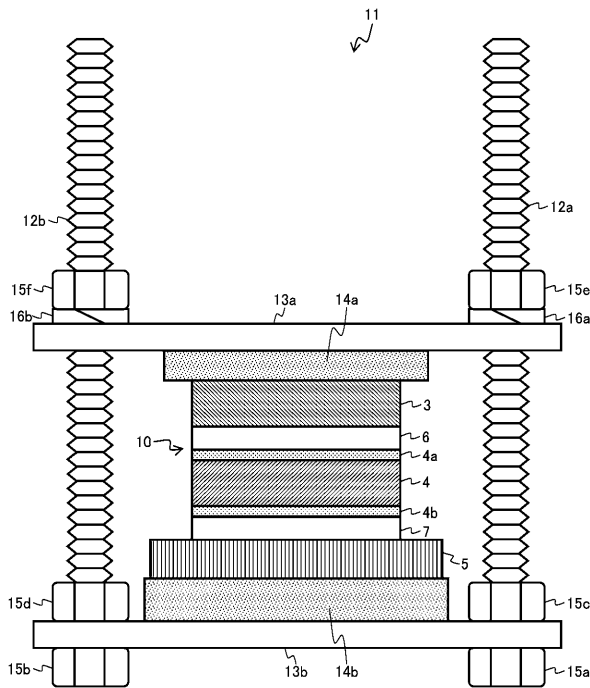
30

40

【図 3】



【図 4】



【図 5】

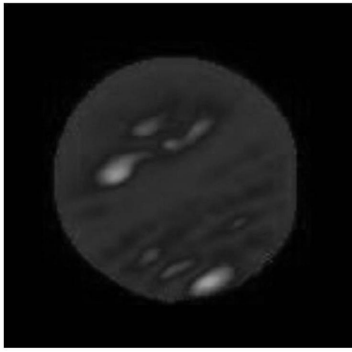
パターン	パターンA	パターンB	パターンC	パターンD	パターンE	パターンF
セラミックプレート14a	x	x	○	○	○	○
セラミックプレート14b	x	x	x	○	○	○
バネ鋼金16a, 16b	x	○	x	x	○ (0a)	○ (0a)
保護シユ-5	Ti	Ti	Ti	Ti	Ti	Nb
接合結果	x	x	x	x	△	○

【図 6】

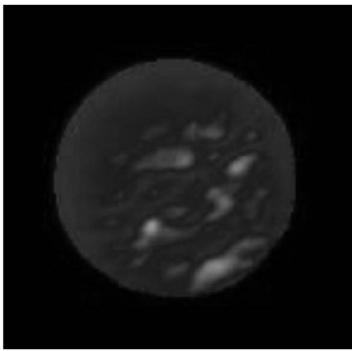
試作体名	シユ-材	接合方法	加熱温度	振動子の割れ	接合面の状態
比較例 1	Ti	Alろう	600℃	あり	○
比較例 2	Ti	活性Agろう	850℃	あり	x
実施例 1	Ti	融解メタライズ法 & Agろう	850℃	あり	△
実施例 2	Nb	融解メタライズ法 & Agろう	850℃	なし	○

【図 7】

(A)



(B)



【図 8】

(A)

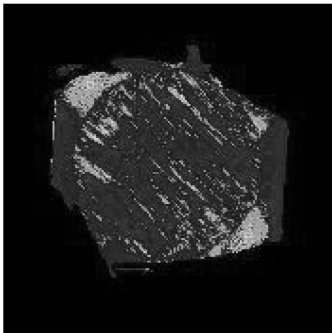


(B)

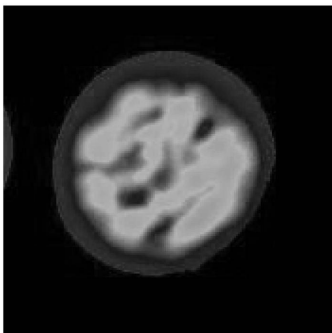


【図 9】

(A)

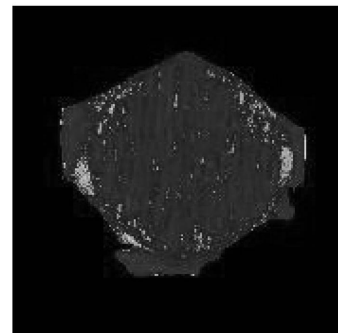


(B)



【図 10】

(A)



(B)



フロントページの続き

(72)発明者 倉内 友己

神奈川県横浜市磯子区新中原町 1 番地 株式会社 I H I 検査計測内

Fターム(参考) 2G047 AA01 AB01 AC01 BA03 BC19 CA01 GA09 GB27 GB35

5D019 AA17 BB02 BB29 FF03 HH01