(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年3月8日(08.03.2018)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2018/043383 A1

(51) 国際特許分類:
G01T 1/00 (2006.01) *G02B 6/02* (2006.01)
G01T 1/20 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2017/030698

(22) 国際出願日： 2017年8月28日(28.08.2017)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2016-167732 2016年8月30日(30.08.2016) JP

(71) 出願人:株式会社クラレ(KURARAY CO., LTD.) [JP/JP]; 〒7100801 岡山県倉敷市酒津１６２１番地 Okayama (JP).

(72) 発明者: 岩川 隆一 (IWAKAWA, Ryuichi); 〒9592691 新潟県胎内市倉敷町２番２８号 株式会社クラレ内 Niigata (JP). 新治 修(SHINJI, Osamu); 〒9592691 新潟県胎内市倉敷町２番２８号 株式会社クラレ内 Niigata (JP).

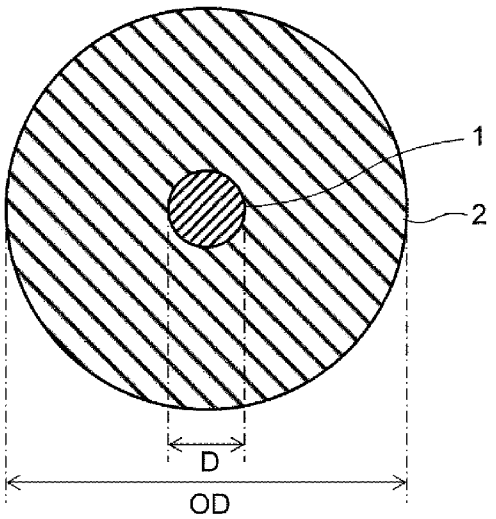
(74) 代理人: 家入 健(IEIRI Takeshi); 〒2210835 神奈川県横浜市神奈川区鶴屋町三丁目３３番８ アサヒビルヂング５階 響国際特許事務所 Kanagawa (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,

(54) **Title:** HIGH-DOSE FIELD PLASTIC SCINTILLATION FIBER AND METHOD OF MANUFACTURING SAME

(54) 発明の名称： 高線量場プラスチックシンチレーションファイバー及びその製造方法



(57) **Abstract:** Provided is a plastic scintillation fiber which has high resolution in a high-dose field, and which has excellent strength and ease of handling. A plastic scintillation fiber according to one mode of embodiment of the present invention includes: a core (1) containing an ultraviolet luminescent fluorescent agent; and a cladding (2) which covers an outer peripheral surface of the core (1) and which has a lower refractive index than the core (1). The outer diameter of the cladding (2) is 0.5 to 2.0 mm, and the diameter of the core (1) is at most equal to 0.2 mm.

(57) 要約：高線量場における分解能が高く、強度とハンドリング性に優れたプラスチックシンチレーションファイバーを提供する。本発明の一態様に係るプラスチックシンチレーションファイバーは、紫外線発光性を有する蛍光剤を含有するコア（１）と、コア（１）の外周面を被覆すると共に、コア（１）よりも低い屈折率を有するクラッド（２）と、を有するものである。クラッド（２）の外径が０．５～２．０ｍｍであり、コア（１）の径が０．２ｍｍ以下であるものである。

WO 2018/043383 A1

［続葉有］

TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

— 国際調査報告（条約第21条(3)）

明　細　書

発明の名称 ：

高線量場プラスチックシンチレーションファイバー及びその製造方法

技術分野

[0001] 本発明はプラスチックシンチレーションファイバー及びその製造方法に関し、特に高線量場での放射線検出に好適なプラスチックシンチレーションファイバー及びその製造方法に関する。

背景技術

[0002] 物質に対して外部から圧力、熱、光といったエネルギーを加えると、物質中の電子がある確率で励起状態へと遷移する。この励起された電子が基底状態に戻る際、余剰エネルギーが熱や光として放出される。この中で、放射線（α線、β線、γ線、Ｘ線などや陽子などの荷電粒子線）をエネルギーとして加えることによって、余剰エネルギーが光として放出される発光現象を、シンチレーションと呼ぶ。

[0003] シンチレーションファイバーは、シンチレーションを利用した放射線検出用の光ファイバーである。シンチレーションファイバーは、シンチレーション性を有する透明基材からなるコアの外周面に、コアよりも低屈折率の透明基材からなるクラッドを被覆したものである。放射線によってコア内で発生した光は、コア／クラッド界面で全反射を繰り返しながら伝播する。最終的に、この光がファイバーの端部に接続されたフォトマルチプライヤ（光電子倍増管）やフォトダイオード等の光検出器によって検知される。

[0004] シンチレーションファイバーでは、コア内で発生した光のみが、コアとクラッドとの界面で全反射を繰り返しながらコア内に閉じ込められて伝播する。クラッド内で発生した光は、表面の汚れやキズによって容易にファイバー外へ散失してしまうからである。

[0005] コア基材は、シンチレーション性が高い、すなわち放射線により電子励起しやすいものから選定される。励起されやすい電子としては、金属元素中の

最外殻電子や不飽和結合のπ電子が代表的である。しかしながら、金属元素の励起光は、自身の光吸収現象により速やかに消失してしまうため、ファイバー用途には適さない。また、透明でシンチレーション性を有する材料として、金属をドープした多成分ガラスなどが知られているが、透明性、加工性、コストなどの点で問題も多い。

[0006] このような観点から、シンチレンションファイバーとしては、π電子を含む有機系のプラスチックシンチレーションファイバーが一般的に用いられている。コア基材としては、透明性が高く、π電子を多く含み、放射線に対して安定であるポリスチレンまたはポリビニルトルエンといったベンゼン環を側鎖に有する樹脂が用いられる。

[0007] このようなプラスチックシンチレーションファイバーのコアを放射線が通過すると、コア基材のπ電子が励起され、材料固有の波長を有するシンチレーション光が放出される。ポリスチレンやポリビニルトルエンは、主に紫外線領域のシンチレーション光を放出する。例えば、ポリスチレンの発光スペクトルは３１０ｎｍにピークを持つ。ところが、このような紫外短波長領域の光は、コア基材自身によって吸収されるため、速やかに消失してしまい、光伝送には適さない。

[0008] そこで、コア基材に紫外線発光性を有する蛍光剤を添加し、シンチレーション光である紫外短波長領域の光をより長い波長の光に変換した後、ファイバー内を伝送させる方法が一般的である。ここで、コア基材に添加された蛍光剤は、コア基材から放出されたシンチレーション光を吸収し、より長波長の光を再放出する。蛍光剤としては、コア基材の発光波長付近に吸収波長を持つものが望ましい。また、伝送波長を調整するために複数の蛍光剤を用いてもよい。このように長波長へ変換された光が、ファイバー内を伝播し、ファイバー端部に接続された検出器によって検知される。

コア内に蛍光剤等を添加して波長変換するもうひとつの理由は、フォトマルチプライヤなどの光検出器の最大波長感度に合致させるためでもある。一般に、フォトマルチプライヤの感度が最大である波長は４３０ｎｍ付近の青

色光であり、近年では微弱光に対応した半導体光検出器（アバランシェフォトダイオード）など、さらに長波長の緑色光に高感度であるものも開発が進んでいる。

[0009] 放射線通過位置の特定法としては、飛行時間差測定法すなわちＴＯＦ（Time Of Flight）法が知られている（特許文献１～３参照）。ＴＯＦ法では、シンチレーションファイバーの両端に検出器を設け、放射線により発光した光パルスがファイバーの両端に到達するまでの時間差を検知することにより放射線の通過位置を算出する。

[0010] ところで、放射線によるシンチレーションは、放射線と基材を構成する原子との相互作用によって発現する。すなわち、一部は原子間の結合を切断し、一部は原子と衝突して原子を陽子、中性子、電子などに分裂させ、一部は跳ね返されて散乱されて、物質内に２次粒子を発生させる。これら１次粒子や２次粒子が物質を構成する原子やその周囲の電子にエネルギーを与えて、一部の電子は励起される。物質がポリスチレンであれば、最終的にベンゼン環のπ電子が励起され、この励起電子が基底状態に戻るときにシンチレーション光が放出される。すなわち、放射線を検知するためには放射線がシンチレーション性を有するコアを通過する必要がある。

[0011] そのため、極微弱な放射線検知の用途に用いられるシンチレーションファイバーでは、コア径を可能な限り太くする必要がある。ここで、ファイバーの外径が大きくなると、剛直となりハンドリング性が悪化したり、湾曲したときに割れやすくなる等の問題がある。また、同一ファイバー径でクラッドが厚くなると、コア径は必然的に小さくなってしまう。そこで、特許文献４では、クラッドの厚さはコアの直径の１～１０％、好ましくは２～３％が適当であるとしている。これらの観点から、クラッドを含めたファイバーの外径を０．５～２．０ｍｍとし、コア径を外径の９７～９８％、すなわち０．４８５～１．９６ｍｍとするのが一般的であった。

先行技術文献

特許文献

[0012] 特許文献1：国際公開第２０１３／１７９９７０号

特許文献2：特開平５－２４９２４７号公報

特許文献3：特開２０１４－２５８３３号公報

特許文献4：特開２０００－１３７１２２号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0013] しかしながら、放射線量の高い、いわゆる高線量場では、極短時間のうちに複数の放射線が一本のコアを通過することがある。ここで、シンチレーション光からなる光パルスが両端の検出器に到達する前に、次の放射線通過によるシンチレーション光の光パルスが発生してしまうと、前後のシンチレーション光を分離することができない。

[0014] すなわち、ＴＯＦ法における位置の特定に必要な時間差に対して無視できない程の高い頻度で複数の放射線がコアを通過するような高線量場では、個々の放射線の情報を分離することはできない。

高線量場としては、例えば粒子フルエンス率が1×10^{5}［１／（m^{2}・ｓ）］以上のものが挙げられる。高線量場では上記問題が生じ得るため、従来のシンチレーションファイバーでは用をなさなかった。ここで、粒子フルエンス率とは、照射場の単位面積を単位時間あたりに通過する粒子（放射線）の数である。

[0015] このような高線量場では、コア径を小さくし、放射線がコアを通過する頻度を少なくすれば良い。ところが、従来のコア径比率を保持したままでコア径を細くすると、必然的にシンチレーションファイバーそのものの外径が細くなるため、強度が低下し、取り扱いの際に切れやすくなる問題があった。また、検出器にセットしにくい等、ハンドリング性に劣る問題があった。

[0016] 本発明は、上記に鑑みなされたものであって、高線量場における分解能が高く、強度とハンドリング性に優れたプラスチックシンチレーションファイバーを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0017] 本発明の一態様に係るプラスチックシンチレーションファイバーは、

紫外線発光性を有する蛍光剤を含有するコアと、前記コアの外周面を被覆すると共に、前記コアよりも低い屈折率を有するクラッドと、を有するプラスチックシンチレーションファイバーであって、

前記クラッドの外径が０．５～２．０ｍｍであり、前記コアの径が０．２ｍｍ以下であるものである。

コアの径が０．２ｍｍ以下であり、従来よりも細いため、高線量場において放射線がコアを通過する確率が低くなり、従来よりも分解能が高い。また、クラッドの外径が、０．５～２．０ｍｍであり、ハンドリング性や強度が従来と同等に優れている。

[0018] 前記クラッドが、インナークラッドと、前記インナークラッドの外周面を被覆すると共に、前記インナークラッドよりも低い屈折率を有するアウタークラッドとを含むマルチクラッド構造を有していることが好ましい。開口数を大きくすることができる。

[0019] また、前記アウタークラッドが、遮光剤を含有することが好ましい。クラッドで発生するシンチレーション光に起因するノイズを低減することができる。

[0020] 本発明の一態様に係るプラスチックシンチレーションファイバーの製造方法は、

紫外線発光性を有する蛍光剤を含有するコアと、前記コアの外周面を被覆するクラッドと、を備えたプラスチックシンチレーションファイバーの製造方法であって、

紫外線発光性を有する蛍光剤を含有する樹脂からなる棒状のコア用ロッドを、前記コア用ロッドよりも低い屈折率を有する樹脂からなる円筒状のクラッド用パイプに挿入してプリフォームを作製する工程と、

前記プリフォームを加熱しつつ線引きする工程と、を備え、

線引きする工程において、前記クラッドの外径を０．５～２．０ｍｍとし、前記コアの径を０．２ｍｍ以下とするものである。

コアの径が０．２ｍｍ以下であり、従来よりも細いため、高線量場において放射線がコアを通過する確率が低くなり、従来よりも分解能が高い。また、クラッドの外径が、０．５～２．０ｍｍであり、ハンドリング性や強度が従来と同等に優れている。

[0021] 前記クラッド用パイプを、インナークラッド用パイプと、前記インナークラッド用パイプの外周面を被覆すると共に、前記インナークラッド用パイプよりも低い屈折率を有する樹脂からなるアウタークラッド用パイプとから構成することが好ましい。開口数を大きくすることができる。

[0022] 前記アウタークラッド用パイプを、遮光剤を含有する樹脂から構成することが好ましい。クラッドで発生するシンチレーション光に起因するノイズを低減することができる。

発明の効果

[0023] 本発明により、高線量場における分解能が高く、強度とハンドリング性に優れたプラスチックシンチレーションファイバーを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0024] [図1]実施の形態１に係るプラスチックシンチレーションファイバーの断面図である。

[図2]実施の形態２に係るプラスチックシンチレーションファイバーの断面図である。

発明を実施するための形態

[0025] 以下、本発明を適用した具体的な実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。ただし、本発明が以下の実施の形態に限定される訳ではない。また、説明を明確にするため、以下の記載及び図面は、適宜、簡略化されている。

[0026] （実施の形態１）

図１を参照して、本発明の実施の形態１に係るプラスチックシンチレーションファイバーについて説明する。図１は、実施の形態１に係るプラスチックシンチレーションファイバーの断面図である。

図１に示すように、本実施の形態に係るプラスチックシンチレーションファイバーは、コア１と、コア１の外周面を被覆するクラッド２と、を備えている。このプラスチックシンチレーションファイバーは、特に高線量場での放射線検出に好適である。

[0027] コア１は、紫外線発光性を有する蛍光剤を含んだ透明樹脂からなる。コア基材としては、例えば耐熱性が高くて取り扱い容易なアクリル系樹脂が用いられる。コア１の径（コア径）Ｄは０．２ｍｍ以下である。コア１を構成するコア基材及び蛍光剤の詳細については後述する。

コア１の外周面を被覆するクラッド２は、コア１よりも低い屈折率を有する透明樹脂からなる。クラッドの外径ＯＤは０．５～２．０ｍｍである。クラッド２を構成するクラッド基材については後述する。

[0028] 本実施の形態に係るシンチレーションファイバーでは、コア１の径Ｄが０．２ｍｍ以下であり、従来よりも細いため、高線量場において放射線がコア１を通過する確率が低くなり、従来よりも高線量場における分解能が高い。また、ファイバーすなわちクラッド２の外径ＯＤが、０．５～２．０ｍｍであり、従来と同程度であるため、ハンドリング性や強度が従来と同等に優れている。すなわち、本発明に係るシンチレーションファイバーでは、従来はできる限り太い方が好ましいとされてきたコア１の径Ｄを細くすることにより分解能を向上させている。また、従来はできる限り薄いほうが好ましいとされていたクラッドを厚くすることにより、強度及びハンドリング性を維持している。

[0029] ［コア基材］

コア基材としては、ベンジルメタクリレート、フェニルメタクリレート、シクロヘキシルメタクリレート、クロロベンジルメタクリレート、１－フェニルエチルメタクリレート、１，２－ジフェニルエチルメタクリレート、ジフェニルエチルメタクリレート、フルフリルメタクリレート、１－フェニルシクロヘキシルメタクリレート、ペンタクロロフェニルメタクリレート、ペンタブロモフェニルメタクリレート、１－ナフチルメタクリレート、２－ナ

フチルメタクリレート、スチレン、α－メチルスチレン、ビニルトルエンのモノマー群のうち、いずれか１種類を重合して得られる重合体及びメチルメタクリレート、ベンジルメタクリレート、フェニルメタクリレート、シクロヘキシルメタクリレート、クロロベンジルメタクリレート、１－フェニルエチルメタクリレート、１，２－ジフェニルエチルメタクリレート、ジフェニルエチルメタクリレート、フルフリルメタクリレート、１－フェニルシクロヘキシルメタクリレート、ペンタクロロフェニルメタクリレート、ペンタブロモフェニルメタクリレート、１－ナフチルメタクリレート、２－ナフチルメタクリレート、スチレン、α－メチルスチレン、ビニルトルエンのモノマー群のうち、いずれか２種類以上のモノマーを共重合して得られる共重合体が適している。

コア基材の屈折率は、例えば１．５４～１．６４の範囲とすることができる。なお、本明細書における屈折率は、アタゴ社製ＮＡＲ－３Ｔ型を用いて、２５℃にて測定波長５８７．６ｎｍ（ｄ線）で測定したものである。

[0030] 重合に際しては、一般的な重合開始剤及び分子量調整剤を添加しても良い。

分子量調整剤は、重合成長反応を抑制するものであれば特に制限はない。代表的な分子量調整剤としてはメルカプタン類が挙げられる。具体的にはメルカプタンとしてノルマルオクチルメルカプタン、ノルマルデカニルメルカプタン等がある。

[0031] ［クラッド基材］

クラッド基材としては、メチルメタクリレート、エチルメタクリレート、ブチルメタクリレート、プロピルメタクリレート、シクロヘキシルメタクリレート、メチルアクリレート、エチルアクリレート、プロピルアクリレート、ブチルアクリレートのモノマー群のうち１種類以上を重合または共重合して得られる重合体が適している。中でも、メチルメチクリレートモノマーの重合体またはメチルメタクリレートと他のモノマーの共重合体が望ましい。メチルメタクリレートは透明性が高く、容易に重合するため取り扱いしやす

い利点がある。重合に際しては、一般的な重合開始剤及び分子量調整剤を添加しても良い。

クラッド基材の屈折率は、コア基材の屈折率よりも０．０５以上小さいことが好ましい。クラッド基材の屈折率は、例えば１．４０～１．５４の範囲とすることができる。

[0032] ［蛍光剤］

コア基材に添加する蛍光剤は、紫外線発光性であり、複数個の芳香環をもち、かつ共鳴が可能な構造を有するものの中から選ばれる。代表的な蛍光剤としては、２－（４－ｔ－ブチルフェニル）－５－（４－ビフェニル）－１，３，４－オキサジアゾール（ｂ－ＰＢＤ）、２－（４－ビフェニル）－５－フェニル－１，３，４－オキサジアゾール（ＰＢＤ）、パラターフェニル（ＰＴＰ）、パラクォーターフェニル（ＰＱＰ）、２，５－ジフェニルオキサゾール（ＰＰＯ）、１－フェニル－３－（２，４，６－トリメチルフェニル）－２－ピラゾリン（ＰＭＰ）、３－ヒドロキシフラボン（３ＨＦ）、４，４‘－ビス－（２，５－ジメチルスチリル）－ジフェニル（ＢＤＢ）、２，５－ビス－（５－ｔ－ブチル－ベンゾキサゾイル）チオフェン（ＢＢＯＴ）、１，４－ビス－（２－（５－フェニロキサゾリル））ベンゼン（ＰＯＰＯＰ）、１，４－ビス－（４－メチル－５－フェニル－２－オキサゾリル）ベンゼン（ＤＭＰＯＰＯＰ）、１，４－ジフェニル－１，３－ブタジエン（ＤＰＢ）、１，６－ジフェニル－１，３，５－ヘキサトリエン（ＤＰＨ）等が挙げられる。

これらは単独で使用してもよいし、複数の蛍光剤を組み合わせて使用してもかまわない。

[0033] 以下に、蛍光剤の組み合わせ例について説明する。

蛍光剤の効能は、コア基材が発するシンチレーション光を吸収し、より長波長の光へと変換して放出することにある。従って、コア基材の発光波長付近に光吸収を持つものが望ましい。これらの蛍光剤の例としてはｂ－ＰＢＤやＰＴＰ、ＰＱＰ等が挙げられる。これらを便宜的に第一蛍光剤と称する。

[0034] ただし、これらの蛍光剤の発光波長は一般に検出器の最適受光感度よりも低いため、より長波長に変換させることが好ましく、第一蛍光剤が発した光をより長波長の光へ変換する蛍光剤を加えることがある。これらを便宜的に第二蛍光剤と称する。第二蛍光剤の例としてはＢＢＯＴ、ＢＤＢ、ＰＯＰＯＰ等が挙げられる。

[0035] 例えば、３ＨＦのような吸収波長と発光波長が大きく離れている蛍光剤は単独で用いることができるが、このような蛍光剤は限られたものしか存在しないので、第一蛍光剤と第二蛍光剤の２種類の蛍光剤を用いることが多い。

第一の蛍光剤の好適添加量は、コア基材に対して０．５～３．０質量％であり、より好ましくは０．８～２．２質量％である。比較的高濃度とする理由は、コア材から発光した短波長のシンチレーション光をコア基材自身で吸収されることなく、その発光位置から短い距離内で、より長波長に波長変換させなければならないからである。第一蛍光剤の添加量が少ないと、最初の波長変換効率が悪化するので最終的な発光性能が確保できない。逆に、過度に添加することは蛍光剤のコア材への溶解性において困難であったり、コスト高になるばかりか、伝送損失悪化の原因にもなる。

また、第二蛍光剤の好適添加量は、コア基材に対して０．０１～０．５質量％であり、より好ましくは０．０２～０．３質量％である。添加量が少な過ぎると、第一蛍光剤で変換した光を効率よく吸収してより長い波長に波長変換することができない。逆に、添加量が多過ぎると、コストアップに繋がるだけでなく、蛍光剤自身の光吸収損失により伝送損失が悪化する。

[0036] ［製造方法］

シンチレーションファイバーの製造方法については、特に制限はない。例えば、円形と筒形を複合させたマルチダイを用いて屈折率の異なる複数の熱可塑性樹脂ペレットを同時に溶融押出してクラッド付きファイバーを成形するいわゆる溶融押出法を用いることができる。あるいは、モノフィラメント状の透明高屈折率樹脂の表面に低屈折率樹脂を塗布してクラッドを形成するいわゆるコーティング法を用いることができる。

[0037] しかしながら、溶融押出法は、押出機のシリンダー内部でせん断応力を受けるため基材や蛍光剤が劣化し透明性が悪化する。また、コーティング法は、一般的なコア径／クラッド厚のファイバーであれば適用できるが、本発明ではモノフィラメント部が細くなるため脆弱となりハンドリング性が悪化する。さらに、クラッドが厚いため、厚みのバラツキが大きくなり、真円性などの寸法精度が悪化する。特に、外径１ｍｍ以上のファイバーでは、クラッド厚が０．４ｍｍ以上となり、もはやコーティングできなくなってしまう。

[0038] そこで、低屈折率基材からなるクラッド用の円筒状透明重合体（クラッド用パイプ）に、高屈折率基材からなるコア用の透明棒状重合体（コア用ロッド）を挿入してプリフォームを作製した後、筒状のヒーターで周囲から加熱して線引きする、いわゆるプリフォーム加熱線引き法が好ましい。

プリフォーム加熱線引き法は、せん断応力を受けないため、基材の劣化が少なく、透明性に優れる。また、コア用ロッドとクラッド用パイプとを別々に作製するため、その後の加熱線引きにより得られるファイバーの寸法精度にも優れている。

[0039] ここで、コア用ロッドは、円筒状の重合容器に入れて熱重合によって作製するのが望ましい。重合方法は熱による自発的重合が好ましいが、最小限量の熱解裂型ラジカル重合開始剤を添加してもよい。さらに、光解裂型ラジカル重合開始剤を併用してもよい。また、コア用ロッドは、分子量が低過ぎると、加熱線引きの際に自重で流れ落ちるドローダウン現象やファイバー径が周期的に変動するドローレゾナンス現象が起こり、寸法精度が保持し難くなる。逆に、分子量が高過ぎると、粘度が高くなるため、加熱温度を高くする必要があり、熱劣化による着色や熱分解といった問題が発生する。このため、必要に応じて、分子量調整剤を添加してもよい。

[0040] また、クラッド用パイプは、回転する円筒容器中で遠心力によってモノマーを円筒容器側面に押し付けるようにして中空部を形成させながら重合固化させる方法により作製することができる。あるいは、ロッド状の重合体の軸中心部にドリル等で穴を開けて中空部を形成する方法や、円形ダイを装着し

た溶融押出機より熱可塑性樹脂ペレットを押出してパイプ状に成形する方法などを用いてもよい。

[0041] （実施の形態２）

次に、図２を参照して、本発明の実施の形態２に係るプラスチックシンチレーションファイバーについて説明する。図２は、実施の形態２に係るプラスチックシンチレーションファイバーの断面図である。

[0042] 図２に示すように、実施の形態１に係るプラスチックシンチレーションファイバーでは、クラッド２が単層からなるマルチクラッド構造を有している。これに対し、実施の形態２に係るプラスチックシンチレーションファイバーでは、クラッド２が、インナークラッド２１及びアウタークラッド２２の２層を少なくとも含むマルチクラッド構造を有している。

[0043] インナークラッド２１は、コア１の外周面を被覆すると共に、コア１よりも低い屈折率を有する透明樹脂からなる。インナークラッド２１を構成するクラッド基材は、実施の形態１におけるクラッド２を構成するクラッド基材と同じであるため、説明を省略する。

[0044] アウタークラッド２２は、インナークラッド２１の外周面を被覆すると共に、インナークラッド２１よりも低い屈折率を有する樹脂からなる。主としてフッ素原子を含む樹脂が用いられる。アウタークラッド２２を構成するアウタークラッド基材、遮光剤の詳細については後述する。

[0045] 実施の形態２に係るシンチレーションファイバーでは、実施の形態１に係るシンチレーションファイバーと同様にコア１の径Ｄが０．２ｍｍ以下であり、従来よりも細い。そのため高線量場において放射線がコア１を通過する確率が低くなり、従来よりも高線量場における分解能が高い。また、ファイバーすなわちクラッド２の外径ＯＤが０．５～２．０ｍｍであり、従来と同程度であるため、ハンドリング性や強度が従来と同等に優れている。

さらに、クラッド２が、インナークラッド２１とインナークラッド２１よりも低い屈折率を有するアウタークラッド２２とを含むマルチクラッド構造を有しているため、実施の形態１に係るシンチレーションファイバーよりも

開口数ＮＡを大きくすることができる。

[0046] ところで、プラスチックシンチレーションファイバーでは、放射線によって分子結合の軸となるσ電子が励起され、この電子が基底状態に戻る際にシンチレーション光が放出されることがある。この発光はコア１とクラッド２のいずれでも起こり得る。ここで、クラッド２から放出されたシンチレーション光がコア１を通過し、コア１の蛍光剤が発光する場合がある。この発光は、コア１に到達した放射線以外によるイレギュラーな発光であり、好ましくない。このようなクラッド２での発光によるコア１の蛍光剤の発光は、コア１での発光によるコア１の蛍光剤の発光に対してタイムラグが発生し、ノイズとなるからである。その結果、放射線通過位置の特定精度が低下する。

[0047] 上述の通り、実施の形態２に係るプラスチックシンチレーションファイバーでは、アウタークラッド２２が、遮光剤を含有していてもよい。アウタークラッド２２が遮光剤を含有することにより、アウタークラッド２２で発生するシンチレーション光がコア１に到達し難くなり、上記ノイズを低減することができる。その際、インナークラッドの厚さは光を閉じ込めることができる伝送波長の数倍以上で、しかもできるだけ薄いことが好ましく、１～２００μｍ、より好ましくは５～３０μｍであることが好ましい。

[0048] ［アウタークラッド基材］

アウタークラッド基材としては、メチルメタクリレート、２，２，２－トリフルオロエチルメタクリレート、２，２，３，３－テトラフルオロプロピルメタクリレート、２，２，３，３，３－ペンタフルオロプロピルメタクリレート、２，２，３，４，４，４－ヘキサフルオロブチルメタクリレート，２，２，３，３，４，４，５，５－オクタフルオロペンチルメタクリレート、α－フルオロアクリル酸メチル、２－（トリフルオロメチル）プロペン酸メチルのモノマー群のうち１種類以上を重合または共重合して得られる重合体及び、前記重合体とポリフッ化ビニリデンの混合物が適している。中でも、２，２，２－トリフルオロエチルメタクリレートポリマーとポリフッ化ビニリデンの混合物が望ましい。

アウタークラッド基材の屈折率は、インナークラッド基材の屈折率よりも０．０５以上小さいことが好ましい。アウタークラッド基材の屈折率は、例えば１．３７～１．４７の範囲とすることができる。

[0049] ［遮光剤］

遮光剤としては、アウタークラッド基材に溶解または分散させた形態で測定した透過率が１０ｍｍの光路長で５０％以下となるものであれば、有機染料、無機顔料のいずれを用いてもよい。また、複数の遮光剤を混ぜて使用してもよい。有機染料としては、MACROLEX（登録商標） Green G、Green 5B（Ｌａｎｘｅｓｓ社製)、無機顔料としては、三菱カーボンブラック（三菱化学社製）等が挙げられる。

実施例

[0050] 以下、本発明を実施例によりさらに詳細に説明するが、本発明は係る実施例により何ら限定されない。

[0051] ＜実施例１＞

［コア用ロッド］

スチレンモノマーに蛍光剤パラターフェニル（ＰＴＰ）１質量％及び２，５－ビス－（５－ｔ－ブチル－ベンゾキサゾイル）チオフェン（ＢＢＯＴ）０．０２質量％を溶解し、これを内径７０ｍｍの円筒容器中にいれ、７０～１２０℃に温度調節して熱重合させた。円筒容器から取り出し、蛍光剤を含んだポリスチレン製ロッドを得た。このポリスチレン製ロッドを加熱線引きし、外径２．５ｍｍのポリスチレン製コア用ロッドを得た。このポリスチレン製コア用ロッドの屈折率は２５℃で１．５９であった。

[0052] ［クラッド用パイプ］

メチルメタクリレートモノマーに重合開始剤（日油社製パーオクタＯ（登録商標）（ＰＯ－Ｏ）：０．０５質量％、日油社製パーヘキサＶ（登録商標）（ＰＨ－Ｖ）：０．０５質量％）と分子量を調整するための連鎖移動剤ｎ－オクチルメルカプタン（ｎ－ＯＭ：０．２５質量％）を添加した。これを内径２５ｍｍの円筒容器に入れ、７０～１２０℃で加熱重合させてポリメチ

ルメタクリレート（ＰＭＭＡ）製ロッドを得た。このＰＭＭＡ製ロッドの円心部をドリルで穴あけ加工し、外径２５ｍｍで内径３ｍｍのＰＭＭＡ製クラッド用パイプを作製した。このＰＭＭＡ製クラッド用パイプの屈折率は２５℃で１．４９であった。

[0053] ［プリフォーム作製及び加熱線引き］

ポリスチレン製コア用ロッドとＰＭＭＡ製クラッド用パイプとを組み合わせてプリフォームを作製した。このプリフォームを加熱線引きし、外径１ｍｍのシンチレーションファイバーを得た。コア径は０．１ｍｍであった。

[0054] ＜実施例２＞

［コア用ロッド］

スチレンモノマーに蛍光剤パラターフェニル（ＰＴＰ）１質量％及び２，５－ビス－（５－ｔ－ブチル－ベンゾキサゾイル）チオフェン（ＢＢＯＴ）０．０２質量％を溶解し、これを内径１０ｍｍの円筒容器中にいれ、７０～１２０℃に温度調節して熱重合させた。円筒容器から取り出し、蛍光剤を含んだポリスチレン製コア用ロッドを得た。このポリスチレン製コア用ロッドの屈折率は２５℃で１．５９であった。

[0055] ［インナークラッド用パイプ］

メチルメタクリレートモノマーに重合開始剤（ＰＯ－Ｏ：０．０５質量％、ＰＨ－Ｖ：０．０５質量％）と分子量を調整するための連鎖移動剤ｎ－オクチルメルカプタン（ｎ－ＯＭ：０．２５質量％）を添加した。これを内径１６ｍｍの円筒容器に入れ、熱媒中で軸方向に回転させながら加熱、重合させて、外径１６ｍｍで内径１１ｍｍのポリメチルメタクリレート（ＰＭＭＡ）製インナーパイプを得た。このＰＭＭＡ製インナーパイプの屈折率は２５℃で１．４９であった。

[0056] ［アウタークラッド用パイプ］

トリフルオロエチルメタクリレート（３ＦＭＡ）モノマーに重合開始剤（ＰＯ－Ｏ：０．０５質量％、ＰＨ－Ｖ：０．０５質量％）と分子量を調整するための連鎖移動剤ｎ－オクチルメルカプタン（ｎ－ＯＭ：０．０２５質量

％）を添加した。これを内径７０ｍｍの円筒容器に入れ、熱媒中で軸方向に回転させながら加熱、重合させて外径７０ｍｍで内径１７ｍｍのポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウターパイプを得た。このポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウターパイプの屈折率は２５℃で１．４２であった。

[0057] ［プリフォーム作製及び加熱線引き］

ポリスチレン製コア用ロッドとＰＭＭＡ製インナーパイプとポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウターパイプとを組み合わせてプリフォームを作製した。このプリフォームを加熱線引きし、外径１ｍｍのシンチレーションファイバーを得た。コア径は０．１４ｍｍであった。

[0058] ＜実施例３＞

ポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウタークラッドに遮光剤として光吸収性をもつ染料MACROLEX Green Gを１００ｐｐｍ（質量比）添加した以外は実施例２と同様に行い、ポリスチレン製コア用ロッドとＰＭＭＡ製インナーパイプとポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウターパイプとを得た。ポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウターパイプの光透過率は、ＪＩＳ　Ｋ７３６１－１に準じて測定したところ、１０ｍｍの厚みにおいて１％であった。

[0059] ［プリフォーム作製及び加熱線引き］

ポリスチレン製コア用ロッドとＰＭＭＡ製インナーパイプとポリトリフルオロエチルメタクリレート製アウターパイプとを組み合わせてプリフォームを作製した。このプリフォームを加熱線引きし、外径１ｍｍのシンチレーションファイバーを得た。コア径は０．１４ｍｍであった。

[0060] ＜比較例＞

［コア用ロッド］

スチレンモノマー蛍光剤パラターフェニル（ＰＴＰ）１質量％及び２，５－ビス－（５－ｔ－ブチル－ベンゾキサゾイル）チオフェン（ＢＢＯＴ）０．０２質量％を溶解し、これを内径６６ｍｍの円筒容器中に入れ、７０～１

２０℃に温度調節して熱重合させた。円筒容器から取り出し、蛍光剤を含んだポリスチレン製コア用ロッドを得た。このポリスチレン製コア用ロッドの屈折率は２５℃で１．５９であった。

[0061] ［クラッド用パイプ］

メチルメタクリレートモノマーに重合開始剤（ＰＯ－Ｏ：０．０５質量％、ＰＨ－Ｖ：０．０５質量％）と分子量を調整するための連鎖移動剤ｎ－オクチルメルカプタン（ｎ－ＯＭ：０．２５質量％）を添加した。これを内径７０ｍｍの円筒容器に入れ、熱媒中で軸方向に回転させながら加熱、重合させて、外径７０ｍｍで内径６８ｍｍのポリメチルメタクリレート（ＰＭＭＡ）製クラッド用パイプを得た。このＰＭＭＡ製クラッド用パイプの屈折率は２５℃で１．４９であった。

[0062] ［プリフォーム作製及び加熱線引き］

ポリスチレン製コア用ロッドとＰＭＭＡ製クラッド用パイプとを組み合わせてプリフォームを作製した。このプリフォームを加熱線引きし、外径１ｍｍのシンチレーションファイバーを得た。コア径は０．９７ｍｍであった。

[0063] 表１に上記条件をまとめて示す。

[表1]

			実施例1	実施例2	実施例3	比較例
ロッド	モノマー	スチレン				
		屈折率	1.59	1.59	1.59	1.59
	蛍光剤	PTP（質量%）	1	1	1	1
		BBOT（質量%）	0.02	0.02	0.02	0.02
	ロッド径(mm)		70→2.5	10	10	66
パイプ	モノマー	MMA				
		屈折率	1.49	1.49	1.49	1.49
	パイプ径	外径(mm)	25	16	16	70
		内径(mm)	3	11	11	68
パイプ	モノマー	3FMA				
	屈折率		−	1.42	1.42	−
	パイプ径	外径(mm)	−	70	70	−
		内径(mm)	−	17	17	−
	遮光剤		−	−	100ppm	−
ファイバー	線引き後	外径(mm)	1	1	1	1
		コア径(mm)	0.1	0.14	0.14	0.97

[0064] シンチレーション光の発光頻度は放射線がコアを通過する確率に比例する。すなわち、コア径の比に比例して発光頻度が変化する。

実施例１に係るシンチレーションファイバーは、比較例に対してシンチレーション光の発生頻度が０．１／０．９７と少ない。また、外径は同じであるため、同等の強度とハンドリング性を有している。

実施例２に係るシンチレーションファイバーは、比較例に対してシンチレーション光の発生頻度が０．１４／０．９７と少ない。また、外径は同じであるため、同等の強度とハンドリング性を有している。

実施例３に係るシンチレーションファイバーは、比較例に対してコアでのシンチレーション光の発生頻度が０．１４／０．９７と少ない。また、外径は同じであるため、同等の強度とハンドリング性を有している。さらに、アウタークラッドが遮光剤を含有しているため、アウタークラッドで発生するシンチレーション光によるノイズが低減する。

[0065] 本発明は上記実施の形態に限られず、趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更可能である。

[0066] この出願は、２０１６年８月３０日に出願された日本出願特願２０１６－１６７７３２を基礎とする優先権を主張し、その開示の全てをここに取り込む。

符号の説明

[0067] １ コア

２ クラッド

２１ インナークラッド

２２ アウタークラッド

請求の範囲

[請求項1] 紫外線発光性を有する蛍光剤を含有するコアと、前記コアの外周面を被覆すると共に、前記コアよりも低い屈折率を有するクラッドと、を有するプラスチックシンチレーションファイバーであって、

前記クラッドの外径が０．５～２．０ｍｍであり、前記コアの径が０．２ｍｍ以下である、プラスチックシンチレーションファイバー。

[請求項2] 前記クラッドが、インナークラッドと、前記インナークラッドの外周面を被覆すると共に、前記インナークラッドよりも低い屈折率を有するアウタークラッドとを含むマルチクラッド構造を有している、請求項１に記載のプラスチックシンチレーションファイバー。

[請求項3] 前記アウタークラッドが、遮光剤を含有する、請求項２に記載のプラスチックシンチレーションファイバー。

[請求項4] 紫外線発光性を有する蛍光剤を含有するコアと、前記コアの外周面を被覆するクラッドと、を備えたプラスチックシンチレーションファイバーの製造方法であって、

紫外線発光性を有する蛍光剤を含有する樹脂からなる棒状のコア用ロッドを、前記コア用ロッドよりも低い屈折率を有する樹脂からなる円筒状のクラッド用パイプに挿入してプリフォームを作製する工程と、

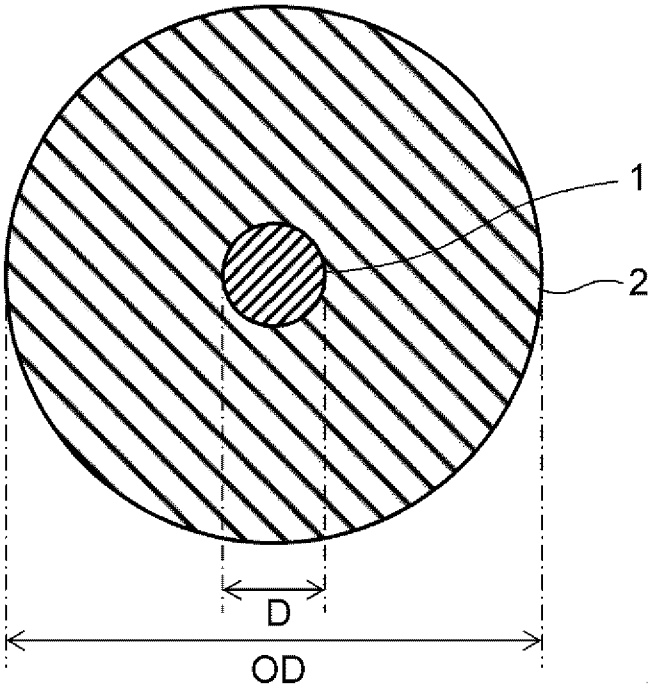
前記プリフォームを加熱しつつ線引きする工程と、を備え、

線引きする工程において、前記クラッドの外径を０．５～２．０ｍｍとし、前記コアの径を０．２ｍｍ以下とする、プラスチックシンチレーションファイバーの製造方法。

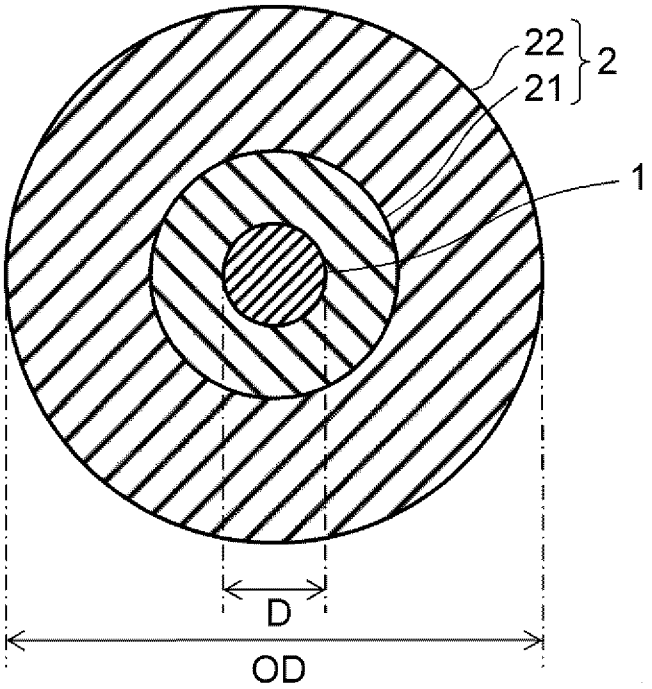
[請求項5] 前記クラッド用パイプを、インナークラッド用パイプと、前記インナークラッド用パイプの外周面を被覆すると共に、前記インナークラッド用パイプよりも低い屈折率を有する樹脂からなるアウタークラッド用パイプとから構成する、請求項４に記載のプラスチックシンチレーションファイバーの製造方法。

[請求項6] 前記アウタークラッド用パイプを、遮光剤を含有する樹脂から構成する、請求項５に記載のプラスチックシンチレーションファイバーの製造方法。

[図1]



[図2]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2017/030698

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01T1/00(2006.01)i, *G01T1/20*(2006.01)i, *G02B6/02*(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01T1/00-1/16, G01T1/167-7/12, G02B6/02-6/036, G02B6/10, G02B6/44

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2000-137122 A (Nissei Electric Co., Ltd.), 16 May 2000 (16.05.2000), entire text; all drawings (Family: none)	1-6
A	WO 2013/179970 A1 (Kuraray Co., Ltd.), 05 December 2013 (05.12.2013), entire text; all drawings & US 2015/0131937 A1 entire text; all drawings	1-6
A	JP 2007-212947 A (Mitsubishi Cable Industries, Ltd.), 23 August 2007 (23.08.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-6

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
07 November 2017 (07.11.17)	21 November 2017 (21.11.17)

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
Japan Patent Office 3-4-3,Kasumigaseki,Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915,Japan	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2017/030698

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2010/0127177 A1 (SCHMITT,William M.), 27 May 2010 (27.05.2010), entire text; all drawings & WO 2010/060089 A2	1-6
A	Hiroaki NISHIMURA et al., "Plasma Diagnostics : High Resolution X-Ray Imaging and Neutron Diaguostics for Laser Fusion Experiments", Journal of Plasma and Fusion Research, vol.70, no.12, [online], 1994.12, [retrieval date 07 November 2017 (07.11.2017)], Internet:<URL: http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_1045 1910_po_ART0005013602.pdf?contentNo=1&alternati veNo=>, pages 1259 to 1268	1-6
A	IKHLEF,A et al., X-ray imaging and detection using plastic scintillating fibers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research SectionA, A 442 (2000), [online], 2000.03.11, [retrieval date 2017.11.07], Internet: <URL: https://ac.els-cdn.com/S0168900299012681/1-s2. 0-S0168900299012681-main.pdf?_tid=5b68e174- c3a7-11e7-9dec-00000aab0f6c&acdnat=1510051102_ fcd3ff0318c71b6b66bbf929bb080c0a>, p.428-432	1-6

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１７／０３０６９８

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01T1/00(2006.01)i, G01T1/20(2006.01)i, G02B6/02(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01T1/00-1/16, G01T1/167-7/12, G02B6/02-6/036, G02B6/10, G02B6/44

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１７年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１７年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１７年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	JP 2000-137122 A（日星電気株式会社）2000.05.16, 全文,全図（ファミリーなし）	1-6
A	WO 2013/179970 A1（株式会社クラレ）2013.12.05, 全文,全図 & US 2015/0131937 A1,全文,全図	1-6
A	JP 2007-212947 A（三菱電線工業株式会社）2007.08.23,全文,全図（ファミリーなし）	1-6

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。　　☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
０７．１１．２０１７	２１．１１．２０１７

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｇ　８３５５
右田　純生
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２２４

C（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	US 2010/0127177 A1 (SCHMITT,William M.) 2010.05.27, 全文,全図 & WO 2010/060089 A2	1-6
A	西村博明　ほか３名, レーザー核融合における高分解能Ｘ線画像および中性子計測, プラズマ・核融合学会誌, 第70巻　第12号, [オンライン], 1994.12,[検索日 2017.11.07], インターネット：<URL:http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10451910_po_ART0005013602.pdf?contentNo=1&alternativeNo=>, p.1259-1268	1-6
A	IKHLEF,A et al., X-ray imaging and detection using plastic scintillating fibers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research SectionA, A 442 (2000), [オンライン], 2000.03.11, [検索日 2017.11.07], インターネット：<URL: https://ac.els-cdn.com/S0168900299012681/1-s2.0-S0168900299012681-main.pdf?_tid=5b68e174-c3a7-11e7-9dec-00000aab0f6c&acdnat=1510051102_fcd3ff0318c71b6b66bbf929bb080c0a>, p.428-432	1-6