(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第6470664号
(P6470664)

(45)発行日　平成31年2月13日(2019.2.13)　(24)登録日　平成31年1月25日(2019.1.25)

(51)Int.Cl.		F I		
G21C 7/10	(2006.01)	G21C	7/10	300
B23K 26/21	(2014.01)	B23K	26/21	N
B23K 26/073	(2006.01)	B23K	26/073	
B23K 26/12	(2014.01)	B23K	26/12	

請求項の数 12　(全 13 頁)

(21)出願番号　特願2015-186522(P2015-186522)
(22)出願日　平成27年9月24日(2015.9.24)
(65)公開番号　特開2017-62140(P2017-62140A)
(43)公開日　平成29年3月30日(2017.3.30)
審査請求日　平成29年8月28日(2017.8.28)

(73)特許権者　507250427
日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社
茨城県日立市幸町三丁目１番１号
(74)代理人　110000350
ポレール特許業務法人
(72)発明者　曽我　幸弘
茨城県日立市幸町三丁目１番１号　日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社内
(72)発明者　多羅沢　湘
茨城県日立市幸町三丁目１番１号　日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社内
(72)発明者　岡田　真
茨城県日立市幸町三丁目１番１号　日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】原子炉制御棒の製造方法および原子炉制御棒

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
原子炉制御棒の支持構造体を構成する少なくとも２つのステンレス鋼製の被溶接部材を準備する工程と、
それぞれの前記被溶接部材の一部にステンレス鋼製の溶接金属線を供給し、かつシールドガスを供給しながらレーザ光を照射して前記被溶接部材を溶接金属部を介してレーザ溶接する溶接工程と、を有し、
前記レーザ光の集光点の形状が矩形であり、かつ前記シールドガスが前記被溶接部材の成分を含まない不活性ガスであり、
前記被溶接部材の下記式（１）で表されるＣｒ／Ｎｉ当量比が１．４４以上であり、
前記溶接工程において、前記溶接金属部のδフェライト量を３．３質量％以上、ポロシティの数が１ｍｍあたり０．２個以下とすることを特徴とする原子炉制御棒の製造方法。
Ｃｒ／Ｎｉ当量比＝（Ｃｒ当量：［Ｃｒ］＋［Ｍｏ］＋１．５［Ｓｉ］＋０．５［Ｎｂ］）／（Ｎｉ当量：［Ｎｉ］＋０．５［Ｍｎ］＋３０［Ｃ］＋３０［Ｎ］）…式（１）
（式（１）中、［］は各成分の含有量（質量％）を示す。）
【請求項２】
前記不活性ガスがＡｒまたはＨｅであることを特徴とする請求項１記載の原子炉制御棒の製造方法。
【請求項３】
前記被溶接部材のＣの含有量が０．０２質量％以下であることを特徴とする請求項１記

載の原子炉制御棒の製造方法。
【請求項４】
前記レーザ光のエネルギー密度分布の形状がガウシアン型またはトップハット型であることを特徴とする請求項１記載の原子炉制御棒の製造方法。
【請求項５】
前記溶接金属部の幅ａと深さｂの比ａ／ｂが１．７以上であることを特徴とする請求項１記載の原子炉制御棒の製造方法。
【請求項６】
前記被溶接部材の溶け込み比率が３０～５０％であることを特徴とする請求項１記載の原子炉制御棒の製造方法。
【請求項７】
前記被溶接部材が、十字型横断面形状のタイロッドとU字形横断面形状のシースであることを特徴とする請求項１ないし６のいずれか１項に記載の原子炉制御棒の製造方法。
【請求項８】
少なくとも２つのステンレス鋼製の被溶接部材が溶接金属部を介して溶接された溶接構造体である原子炉制御棒の支持構造体を含み、
前記溶接金属部のδフェライト量が３．３質量％以上であり、かつポロシティの数が１ｍｍあたり０．２個以下であり、
前記被溶接部材の下記式（１）で表されるＣｒ／Ｎｉ当量比が１．４４以上であることを特徴とする原子炉制御棒。
Ｃｒ／Ｎｉ当量比＝（Ｃｒ当量：［Ｃｒ］＋［Ｍｏ］＋１．５［Ｓｉ］＋０．５［Ｎｂ］）／（Ｎｉ当量：［Ｎｉ］＋０．５［Ｍｎ］＋３０［Ｃ］＋３０［Ｎ］）…式（１）
（式（１）中、［］は各成分の含有量（質量％）を示す。）
【請求項９】
前記被溶接部材のＣの含有量が０．０２質量％以下であることを特徴とする請求項８記載の原子炉制御棒。
【請求項１０】
前記溶接金属部の幅ａと深さｂの比ａ／ｂが１．７以上であることを特徴とする請求項８記載の原子炉制御棒。
【請求項１１】
前記被溶接部材の溶け込み比率が３０～５０％であることを特徴とする請求項８記載の原子炉制御棒。
【請求項１２】
前記被溶接部材が、十字型横断面形状のタイロッドとU字形横断面形状のシースであることを特徴とする請求項８記載の原子炉制御棒。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、原子炉制御棒の製造方法および原子炉制御棒に関する。
【背景技術】
【０００２】
原子力設備の炉内構造物等の溶接には、ポロシティおよび溶接割れ等の溶接欠陥の無い高品質な溶接が要求される。一般的に、これらの溶接にはＴＩＧ（Ｔｕｎｇｓｔｅｎ　Ｉｎｅｒｔ　Ｇａｓ）溶接またはレーザ溶接が適用される。
【０００３】
炉内構造物である制御棒を構成するステンレス鋼製のタイロッドとシースとをＴＩＧ溶接により溶接した場合、その溶接金属部では、完全溶着させているため、すきま腐食は発生しない。しかしながら、ＴＩＧ溶接の熱影響によりタイロッドの収縮およびシースの変形が見られ、制御棒の真直性などの品質に影響を与え、修正作業に時間を費やす原因となっている。

【０００４】
一方、タイロッドとシースとをレーザ溶接する場合では、ＴＩＧ溶接と同様に完全溶着させているため、すきま腐食は発生しない。また、ＴＩＧ溶接より熱影響が少ないため、タイロッドの収縮およびシースの変形も少なく、制御棒の真直性などの品質が向上する。しかし、ＴＩＧ溶接に比べて冷却速度が速いため、レーザ溶接金属部ではδフェライト量（δフェライト生成量）が少なくなり、高温割れが発生しやすくなる。
【０００５】
ＴＩＧ溶接またはレーザ溶接を使用した原子炉制御棒の製造に関する公知技術として、例えば特許文献１がある。特許文献１には、レーザ溶接またはＴＩＧ溶接により部品相互を接合するようにした原子炉制御棒の製造方法及び製造装置が開示されており、具体的には、部品溶接時に開先位置上または開先位置から平行に２ｍｍ以内でずらした位置にＹＡＧレーザ光またはCO_2レーザ光を光学系を通して照射し、かつ、２パス目以降の狙い位置を０．１～０．２ｍｍの範囲でずらして数パスラップさせるようにするか、またはレーザ光を２ｍｍ以内で円運動した状態で前進させながら照射するか、または集光レンズの手前にプリズムを入れ、このプリズムを用いることでレーザ光の焦点位置を回転させること、などが開示されている。特許文献２によれば、レーザ光による溶接を実施することにより、入熱量を少なくして加工後の変形を抑制することができ、且つ溶接速度を上げて生産性を向上させることができる原子炉の制御棒とその製造方法及び製造装置を提供できるとされている。
【０００６】
また、レーザ溶接部におけるδフェライト量を制御（改善）する技術として、例えば特許文献２がある。特許文献２は、沸騰水型原子炉用制御棒の製造方法に係り、レーザ照射角度をシース側より斜め６０～８０°とし、かつ溶接ワイヤのＣｒ（クロム）／Ｎｉ（ニッケル）当量比が１．６～１．９と規定している。特許文献２では、レーザ溶接条件およびレーザ溶接ワイヤの組成によってレーザ溶接部のδフェライト量を制御している。特許文献１によれば、溶接性に優れ、高温割れを抑制し、溶接時の変形、残留応力を極力抑えたレーザ溶接法により、高精度、高品質、高信頼の沸騰水型原子炉用制御棒の製造が容易にできるとされている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００７】
【特許文献１】特開２０００‐３２９８８５号公報
【特許文献２】特許第４９６１１５４号
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００８】
しかしながら、上述したとおり、冷却速度が速いレーザ溶接ではδフェライトの量が少なくなることに加え、特許文献２のように溶接時にシールドガスとして窒素（N_2）を使用する場合、溶接金属部のＣｒ当量／Ｎｉ当量比が小さくなり、δフェライトの量が更に少なくなる。一方、シールドガスをN_2ガスからアルゴン（Ａｒ）ガスへ変更することでδフェライトの量が改善することが知られているが、シールドガスとしてアルゴンガスを使用すると溶接金属部にポロシティが生成し、溶接欠陥の無い溶接金属部を得ることが難しくなる。
【０００９】
さらに、原子炉制御棒を構成する部材（例えば、タイロッドおよびシース）の材料であるステンレス鋼は、高温水中における溶接熱影響部の鋭敏化域で発生する応力腐食割れの対策として、炭素含有量を０．０２質量％まで減らしている。この炭素含有量低下による強度低下を補うために窒素（Ｎ）を添加し、Ｎ含有量を約０．０４質量％以上としたステンレス鋼が採用されている。通常のＮ添加無しの場合の窒素含有量は０．０２質量％以下である。Ｎを添加することにより、Ｎを添加しない場合よりも溶接金属部のＣｒ／Ｎｉ当

量比は低下する（Ｃｒ／Ｎｉ当量比≦１．４）。このため、タイロッドとシースのＣｒ／Ｎｉ当量比は通常のオーステナイトステンレス鋼よりも低く、δフェライトの量が減少し、溶接部の高温割れ感受性が高くなる。

【００１０】

上述した特許文献１および２では、溶接金属部のδフェライト量の増加とポロシティの抑制を両立するための検討はなされておらず、近年原子炉制御棒に要求されている高い品質を十分に満たすことはできない可能性がある。

【００１１】

したがって、本発明は、上記事情に鑑み、溶接金属部のδフェライト量を増加し、かつポロシティを低減することが可能な原子炉制御棒の製造方法およびその製造方法を用いて作製された原子炉制御棒を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【００１２】

本発明は、上記目的を達成するため、原子炉制御棒の支持構造体を構成する少なくとも２つのステンレス鋼製の被溶接部材を準備する工程と、それぞれの上記被溶接部材の一部にステンレス鋼製の溶接金属線を供給し、かつシールドガスを供給しながらレーザ光を照射して上記被溶接部材を溶接金属部を介してレーザ溶接する溶接工程と、を有し、上記レーザ光の集光点の形状が矩形であり、かつ上記シールドガスが上記被溶接部材の成分を含まない不活性ガスであり、上記被溶接部材の下記式（１）で表されるＣｒ／Ｎｉ当量比が１．４４以上であり、上記溶接工程において、上記溶接金属部のδフェライト量を３．３質量％以上、ポロシティの数が１ｍｍあたり０．２個以下とすることを特徴とする原子炉制御棒の製造方法を提供する。

Ｃｒ／Ｎｉ当量比＝（Ｃｒ当量：［Ｃｒ］＋［Ｍｏ］＋１．５［Ｓｉ］＋０．５［Ｎｂ］）／（Ｎｉ当量：［Ｎｉ］＋０．５［Ｍｎ］＋３０［Ｃ］＋３０［Ｎ］）…式（１）

式（１）中、［］は各成分の含有量（質量％）を示す。

【００１３】

また、本発明は、少なくとも２つのステンレス鋼製の被溶接部材が溶接金属部を介して溶接された溶接構造体である原子炉制御棒の支持構造体を含み、上記溶接金属部のδフェライト量が３．３質量％以上であり、かつポロシティの数が１ｍｍあたり０．２個以下であり、前記被溶接部材の下記式（１）で表されるＣｒ／Ｎｉ当量比が１．４４以上であることを特徴とする原子炉制御棒を提供する。

Ｃｒ／Ｎｉ当量比＝（Ｃｒ当量：［Ｃｒ］＋［Ｍｏ］＋１．５［Ｓｉ］＋０．５［Ｎｂ］）／（Ｎｉ当量：［Ｎｉ］＋０．５［Ｍｎ］＋３０［Ｃ］＋３０［Ｎ］）…式（１）

（式（１）中、［］は各成分の含有量（質量％）を示す。）

【発明の効果】

【００１４】

本発明によれば、レーザ溶接金属部のδフェライト量を増加し、かつポロシティを低減することが可能な原子炉制御棒の製造方法およびその製造方法を用いて作製された原子炉制御棒を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１】本発明に係る原子炉制御棒の製造方法（溶接工程）の一例を示す模式図である。

【図２Ａ】レーザ光の集光点の形状（矩形）とレーザ光のエネルギー密度分布の形状を示す模式図である。

【図２Ｂ】レーザ光の集光点の形状（円形）とレーザ光のエネルギー密度分布の形状を示す模式図である。

【図３】溶接金属部のδフェライト量と溶接金属部のＣｒ／Ｎｉ当量比の関係を示すグラフである。

【図４】溶接金属部のポロシティの数とレーザエネルギー密度との関係を示すグラフである。

【図５】レーザ溶接金属部の幅／深さの比の関係を示す模式図である。
【図６Ａ】本発明に係る原子炉制御棒の一例を示す上面図である。
【図６Ｂ】本発明に係る原子炉制御棒の一例を示す分解斜視図である。
【発明を実施するための形態】
【００１６】
以下、本発明の実施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、本発明は以下の実施形態に限定されるものではなく、本発明の要旨を変更しない範囲で様々な改良および変更を加えることができる。
【００１７】
［原子炉制御棒の製造方法］
以下、本発明に係る原子炉制御棒の製造方法について説明する。図１は本発明に係る原子炉制御棒の製造方法（溶接工程）の一例を示す模式図である。本発明に係る原子炉制御棒の製造方法は、原子炉制御棒を構成する少なくとも２つのステンレス鋼製の部材（被溶接部材）１，２を準備する工程と、この被溶接部材１，２のそれぞれの一部をレーザ溶接する溶接工程（レーザ溶接工程）を有し、この工程において原子炉制御棒を収容する溶接構造体（制御棒支持構造体）を製造する。
【００１８】
被溶接部材を準備する工程では、原子炉制御棒を構成する部材を準備する。本実施例では、被溶接部材として原子炉制御棒を構成する十字型横断面形状のタイロッドとＵ字型横断面形状のシースを用いた。これらの構成については、追って詳述する。なお、本発明が適用される原子炉制御棒の構成はこれに限定されるものではなく、レーザ溶接によって作製可能なものであればどのような構成を有していてもよい。以下の製造方法の説明では、タイロッド１のフィン段差部とシース２の凸型先端部を溶接する場合を例にして説明する。
【００１９】
レーザ溶接工程では、レーザ発振器（図示せず）から発振されたレーザ光４がファイバーにより伝送され、伝送されたレーザ光４が集光されて、レーザ加工ヘッド５を介して被溶接材１，２の溶接箇所に照射される。シールドノズル７は、被溶接部材のレーザ光照射部に形成されたキーホールの上部にシールドガス６を吹き付け、レーザ光照射部に溶接ヒュームを付着させないようにしている。ワイヤ送給装置（図示せず）によってワイヤ送給ノズル９を介してレーザ光照射部位に生じる溶融プールに溶接金属線（溶接ワイヤ）８が供給される。
【００２０】
本発明では、溶接工程におけるシールドガス６として被溶接部材の成分を含まない不活性ガスを用い、レーザ光４の集光点の形状を矩型とする。このようにすることで、溶接金属部３におけるδフェライトの量を増加し、かつ溶接金属部３におけるポロシティ（溶接欠陥）を低減することが可能となる。
【００２１】
以下、実施例１、比較例１および比較例２に基づいて本発明の効果について実証する。実施例１、比較例１および比較例２においてそれぞれ異なる条件で溶接工程を実施し、溶接金属部のδフェライト量とポロシティの数について評価した。溶接条件を表１に示す。
【００２２】

【表１】

表1 実施例1、比較例1および比較例2の溶接条件

		実施例1	比較例1	比較例2
被溶接部材		SUS316L	SUS316L	SUS316L
シールドガス	ガス種類	Ar	N_2	Ar
	供給速度 (L/min)	50	50	50
レーザ条件	レーザ光源	YAG	Nd:YAG	YAG
	レーザ集光点形状 (サイズ)	矩形 (0.4 mm×1.7 mm)	円形 (Φ0.6 mm)	円形 (Φ0.34 mm)
	出力 (kW)	2～3.2	1.3～1.6	2
	エネルギー密度 (kW/mm^2)	3～5	22	22
	焦点はずし距離 (mm)	0	−1～1.5	0
	照射角度 (°)	−	15～20	−
溶接ワイヤ	溶接ワイヤ組成	YS308L	YS308L	YS308L
	溶接ワイヤ径 (mm)	Φ0.8	Φ0.8	Φ0.8
	ワイヤ送給速度 (m/min)	1.1～3	2～3	2～3
溶接速度 (m/min)		0.5～1	0.4～0.5	0.5

【００２３】

溶接工程は、次の手順で実施した。まず始めに、レーザ加工ヘッド５をレーザ溶接スタート位置に搬送し、シールドノズル７よりシールドガス６を流す。レーザ溶接ワイヤ８がワイヤ送給装置より送給され、タイロッド１のフィン段差部とレーザ溶接ワイヤ８が接触したら、レーザ加工ヘッド５より、レーザ光４が照射されるのと同時にレーザ加工ヘッド５が走行してレーザ溶接を開始し、被溶接部材１の所定箇所までレーザにより溶接する。

【００２４】

図２Ａはレーザ光の集光点の形状（矩形）とレーザ光のエネルギー密度分布の形状を示す模式図であり、図２Ｂはレーザ光の集光点の形状（円形）とレーザ光のエネルギー密度分布の形状を示す模式図である。実施例１のレーザ集光点の形状は図２Ａに示す矩形（トップハット型エネルギー密度分布２１ａ´）とし、比較例１および２のレーザ集光点の形状は図２Ｂに示す円形とした。レーザ発振器には直接集光型半導体レーザを用いた。

【００２５】

まず、シールドガス７の種類と溶接金属部３のδフェライトの量の関係について説明する。図３は、溶接金属部３のδフェライトの量と溶接金属部のＣｒ／Ｎｉ当量比の関係を示すグラフである。溶接金属部３のδフェライトの量は、フェライトスコープを用いて測定した。Ｃｒ／Ｎｉ当量比は、被溶接部材１，２と溶接ワイヤ８の組成および溶け込み比

率から計算した。なお、Ｃｒ／Ｎｉ当量比と被溶接部材の各成分組成の関係は、以下の式（１）の通りである。Ｃｒ当量はＣｒと同等の効果を表すフェライト生成元素であるＣｒ、モリブデン（Ｍｏ）、シリコン（Ｓｉ）、ニオブ（Ｎｂ）の指数を表したものである。Ｎｉ当量はＮｉと同等の効果を表すオーステナイト生成元素であるＮｉ、マンガン（Ｍｎ）、炭素（Ｃ）、Ｎの指数を表したものである。

【００２６】

Ｃｒ／Ｎｉ当量比＝（Ｃｒ当量：［Ｃｒ］＋［Ｍｏ］＋１．５［Ｓｉ］＋０．５［Ｎｂ］）／（Ｎｉ当量：［Ｎｉ］＋０．５［Ｍｎ］＋３０［Ｃ］＋３０［Ｎ］）…式（１）

（式（１）中、［］は各成分の含有量（質量％）を示す。）

図３に示すＣｒ／Ｎｉ当量比は溶接前の値であり、溶接中にシールドガスから溶接金属部３へ吸収される$Ｎ_2$の量を考慮した値ではない。

【００２７】

実施例１（シールドガス：Ａｒガス）のタイロッド１のフィン段差部とシース２凸型先端部とのレーザ溶接金属部３を調査した結果、タイロッド１のフィン段差部とシース２凸型先端部とのレーザ溶接金属部３のＣｒ／Ｎｉ当量比（計算値）は１．４４から１．４７であった。また、レーザ溶接金属部３のフェライト量を調査した結果、タイロッド１のフィン段差部とシース２凸型先端部とのレーザ溶接金属部３のδフェライト量（実測値）は、３．３～５．０質量％であった。一方、比較例１（シールドガス：$Ｎ_2$）の場合、レーザ溶接金属部３のＣｒ／Ｎｉ当量比とδフェライト量との関係は、Ｃｒ／Ｎｉ当量比１．４～１．５３に対し、δフェライト量は１．４％～４．４％であった。

【００２８】

上記結果から、シールドガス６にＡｒを使用することにより、シールドガス６に$Ｎ_2$ガスを使用する場合よりδフェライト量が増加していることがわかる。実施例１タイロッド１のフィン段差部とシース２の凸型先端部との溶接金属部３のＣｒ／Ｎｉ当量とフェライト量の関係を外挿すると、Ｃｒ／Ｎｉ当量比１．４％以下のタイロッドおよびシースにおいても、レーザ溶接金属部３のδフェライト量は、Ｃｒ／Ｎｉ当量比が１．３７以上であれば２％以上確保することができることがわかる。同じＣｒ／Ｎｉ当量比の場合、シールドガス６にアルゴンガスを使用した方がシールドガス６に$Ｎ_2$ガスを使用した場合よりもδフェライト量は増加している。これは、シールドガス６にＡｒガスを用いることで、$Ｎ_2$ガスを用いる場合よりも、溶接時の溶接金属部のＣｒ／Ｎｉ当量比の低下を防ぐことができるためであると考えられる。

【００２９】

シールドガス６は、Ａｒガス以外でも、被溶接部材の成分を含まない不活性ガス、すなわち上記式（１）で表されるＣｒ／Ｎｉ当量比に影響を及ぼさない不活性ガスであれば、上記Ａｒガスを使用した場合と同様の効果が得られるものと考えられる。例えば、Ａｒガスに代えてヘリウム（Ｈｅ）ガスを用いても同様の効果が得られると考えられる。

【００３０】

次に、レーザ光の集光点の形状とδフェライト量の関係について説明する。図４は溶接金属部のポロシティの数とレーザエネルギー密度との関係を示すグラフである。ポロシティの数は、溶接ビードの放射線透過検査（ＲＴ：Ｒａｄｉｏｇｒａｐｈｉｃ　Ｔｅｓｔｉｎｇ）によって評価した。実施例１および比較例２ともに複数の溶接構造体（被溶接部材の溶接体）を作製し、各溶接構造体の評価結果をプロットしている。

【００３１】

図４に示すように、ビーム形状が矩形の実施例１の場合、レーザエネルギー密度は３～５ｋＷ／$ｍｍ^2$であり、溶接金属部３のポロシティは１ｍｍあたり０．２個以下である。一方、ビーム形状が円形の比較例２の場合、レーザエネルギー密度は約２２ｋＷ／$ｍｍ^2$であり、溶接金属部３のポロシティは１ｍｍあたり１～２．６個である。この結果から、実施例１では、レーザエネルギー密度が低くなり、ポロシティ数が抑制できているが、比較例２では、エネルギー密度が高くなりポロシティ生成が抑制できていないことがわかる。

【００３２】
上記結果について、以下に考察する。ビーム形状が矩形の場合、円形の場合と比較すると、単位面積あたりのエネルギーは小さくなり、エネルギー密度を低くすることによってポロシティ生成が抑制できると考えられる。また、ポロシティ発生の数は、ビーム形状が大きく起因していると考えられる。ポロシティはキーホールの先端部で蒸発に伴う気泡がシールドガスを巻き込み、湯流れによる輸送中に凝固壁にトラップされ、生ずると考えられている。レーザ光４の集光点の形状が円形でも矩形でもシールドガス６にアルゴンガスを用いた場合には、キーホール先端部で気泡は生じているものと思われる。しかしながら、ビーム形状が円形でもビーム径が大きいほうがポロシティの発生数は少ない。このため、気泡の発生数はレーザ光４の集光点の形状が円形形状より、エネルギー密度の低い矩形形状の方が少ないと考えられる。さらに、集光点が矩形の場合は、キーホール幅が長くなるため、キーホールの先端部で発生した気泡が逸散しやすく、気泡がキーホール内にトラップされにくいと推察される。

【００３３】
集光点の形状は、矩形であれば正方形であっても長方形であってもよい。また、集光点の形状が矩形であれば、エネルギー密度分布の形状に限定は無いが、図２Ａに示すガウシアン型とトップハット型では、トップハット型の方がより好ましい。これは、トップハット型はガウシアン型よりも中心（ピーク）のエネルギー密度が低くなるため、キーホール先端部での溶融金属の蒸発及び気泡の発生が少なくなり、結果として溶接金属中のポロシティの抑制に効果があると考えられるためである。

【００３４】
以上のとおり、本発明に係る原子炉制御棒の製造方法では、レーザ溶接工程におけるシールドガス６として被溶接部材の成分を含まない不活性ガスを用い、レーザ光４の集光点の形状を矩型とすることで、溶接金属部３におけるδフェライトの量を増加し、かつ溶接金属部３におけるポロシティ（溶接欠陥）を低減することが可能となる。

【００３５】
［原子炉制御棒］
次に、上述した本発明に係る原子炉制御棒の製造方法を用いて作製した原子炉制御棒について説明する。図６Ａは本発明に係る原子炉制御棒の一例を示す上面図であり、図６Ｂは本発明に係る原子炉制御棒の一例を示す分解斜視図である。図６Ａおよび６Ｂに示す原子炉制御棒は、十字形横断面形状のオーステナイトステンレス鋼製タイロッド１とＵ字形横断面形状のオーステナイトステンレス鋼製シース２のレーザ溶接構造体を原子炉制御棒の支持構造体として含む。本発明において「原子炉制御棒」は、この支持構造体を含めたものとする。タイロッド６１とシース６４の一面に溶接箇所６７が２１箇所あり、全体で１６８箇所である。上述した本発明に係る原子炉制御棒の製造方法によれば、本発明に係る原子炉制御棒は、溶接金属部におけるδフェライト量が十分な量であるため、高温強度を十分に発揮することができる。さらに、溶接金属部におけるポロシティの数が少ないため、信頼性に優れる。したがって、本発明によれ高品質な原子炉制御棒を提供することができる。

【００３６】
被溶接部材（タイロッド６１とシース６４）の組成は、特に限定は無いが、以下に示すオーステナイト鋼であることが好ましい。炭素（Ｃ）に関しては、オーステナイト安定化元素であり、強度向上の観点から、０．０３質量％以下が好ましい。耐応力腐食性を維持するためには、０．０２質量％以下がさらに望ましい。Ｎ組成に関しては、オーステナイト安定化元素であり、強度向上の観点から、０．０３質量％以上が望ましい。一般的なタイロッドとシースのＮの含有量は０．０４質量％以上である。シールドガス６にN_2ガスを使用すると、タイロッド１のフィン段差部とシース２の凸型先端部とのレーザ溶接部３のＮ組成は、タイロッド１とシース２のＮ組成より増加する。Ｎはオーステナイト強化成分であり、溶接金属部に含まれることによりオーステナイト化を促進し、結果としてδフェライト量は減少することになる。本発明では、シールドガスとしてＡｒガスを用いるこ

とにより、一般的なタイロッドとシースのＮの含有量（０．０４質量％以上）であっても溶接金属部のＣｒ／Ｎｉ当量比の値の低下を防止し、δフェライト量低下を防止することができる。

【００３７】

次に、溶接金属部の幅と深さの比、溶け込み比率およびδフェライト量の関係について説明する。図５は、レーザ溶接金属部の幅／深さの比の関係を示す模式図である。実施例２として、ａ／ｂ＝１．７～２．３の溶接構造体を用意した。ａ／ｂは、溶接条件によって変化させることができる。ａ／ｂ＝１．７の場合の溶接条件は、レーザ出力２．８ｋＷ、溶接速度０．５ｍ／ｍｉｎおよびワイヤ送給速度３．０ｍ／ｍｉｎであり、これ以外の条件は実施例１と同様である。また、ａ／ｂ＝２．３の場合の溶接条件は、レーザ出力２．５ｋＷ、溶接速度１．０ｍ／ｍｉｎおよびワイヤ送給速度１．１ｍ／ｍｉｎであり、これ以外の条件は実施例１と同様である。

【００３８】

ａ／ｂ＝１．７～２．３の溶接構造体について、被溶接部材（タイロッド）の溶け込み比率（計算値）とδフェライト量（測定値）について評価した。評価結果を表２に示す。

【００３９】

【表２】

表2 溶接金属部の幅と深さの比(a/b)、溶け込み比率およびδフェライト量の関係

	溶接金属部の幅(a)と深さ(b)の比 a/b	タイロッド 溶け込み比率 (%)	δフェライト量 (質量%)
実施例2	1.7～2.3	33～43	3.3～5

【００４０】

レーザ溶接金属部３のδフェライト量を調査した結果、タイロッド１のフィン段差部とシース２凸型先端部とのレーザ溶接金属部３のδフェライト量は３．３～５質量％であった。実施例２の溶接構造体は、レーザ溶接金属部３に発生しやすい高温割れを十分に防止することが出来るδフェライト量を有していることが分かる。

【００４１】

上記評価に加えて、実施例２のタイロッド１のフィン段差部とシース２凸型先端部との溶接金属部３のＮ原子含有量を測定した。タイロッド１とシース２のレーザ溶接後、溶接金属部３のサンプルを採取し、不活性ガス溶解熱伝導法により、溶接金属内部のＮガス含有量を測定した。その結果、シールドガス６に$Ｎ_2$ガスを使用する場合、溶接金属部３のＮ原子含有量は６００～８００ｐｐｍである。タイロッド１、シース２の成分、溶接条件により異なるケースもある。一方、シールドガス６にＡｒを使用する場合、外部からＮが溶接金属部３に入り込むことは無いため、溶接金属部のＮ原子含有量は、使用したタイロッド１、レーザ溶接ワイヤ８およびシース２のうち最もＮ含有量が高いもののＮ含有量以下の値となる。溶接金属部のＮ含有量は、溶タイロッド１、シース２およびレーザ溶接ワイヤ８の溶け込み比率によって異なる。

【００４２】

以上説明したように、本発明によれば、レーザ溶接金属部のδフェライト量を増加し、かつポロシティを低減することが可能な原子炉制御棒の製造方法およびその方法を用いて作製された原子炉制御棒を提供可能であることが示された。

【００４３】

なお、本発明は上記した実施例に限定されるものではなく、様々な変形例が含まれる。上記した実施例は本発明を分かりやすく説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施例の構成の一部を他の実施例の構成に置き換えることも可能であり、ある実施例の構成に他の実施例の構成を加えるこ

とも可能である。また、各実施例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることも可能である。

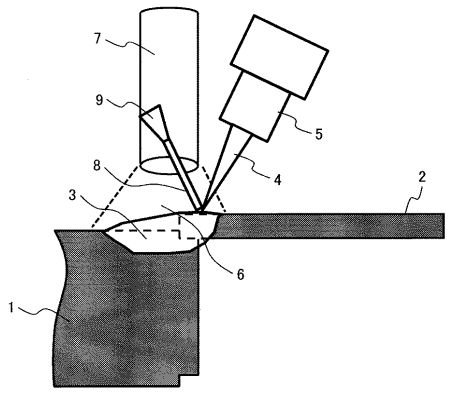
【符号の説明】

【００４４】

１…タイロッド、２…シース、３…溶接金属部、４…レーザ光、５…レーザ加工ヘッド、６…シールドガス、７…シールドノズル、８…溶接ワイヤ、９…ワイヤ送給ノズル、２０ａ…レーザ光の集光点の形状（矩形）、２０ｂ…レーザ光の集光点の形状（円形）、２１ａ…レーザ光のエネルギー密度分布（ガウシアン型）、２１ａ´…レーザ光のエネルギー密度分布（トップハット型）、２１ｂ…レーザ光のエネルギー密度分布、６１…タイロッド、６２…フィン、６４…シース、６５…シースの凸型先端部、６６…制御棒、６７…溶接箇所、６８…冷却孔、６９…制御棒支持構造体、７０…ハンドル、７１…落下速度リミッタ。

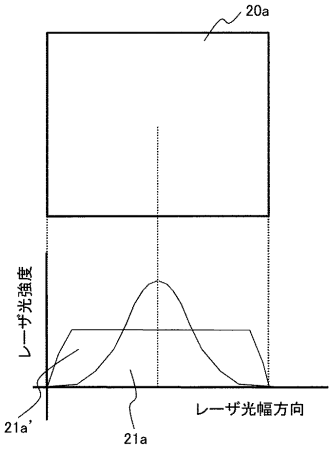
【図１】

図 1



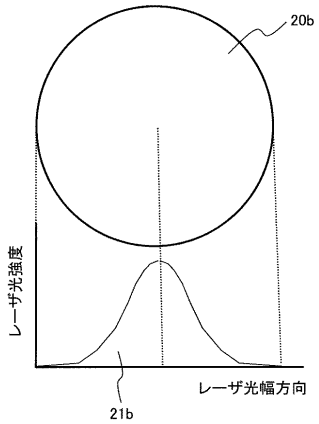
【図２Ａ】

図 2A



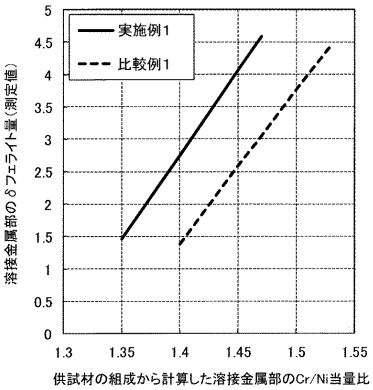
【図２Ｂ】

図 2B



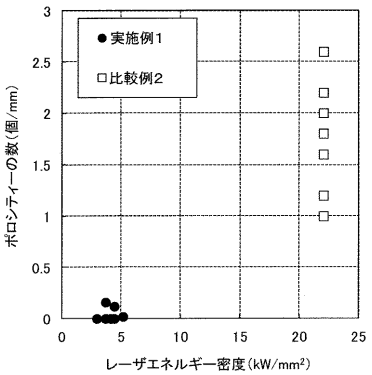
【図３】

図 3



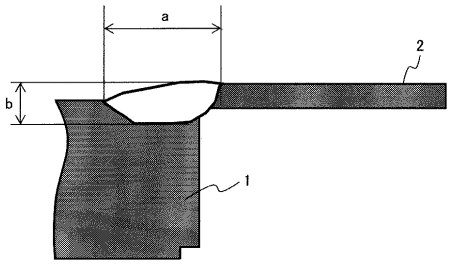
【図４】

図 4



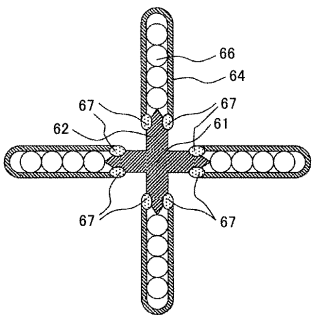
【図５】

図 5



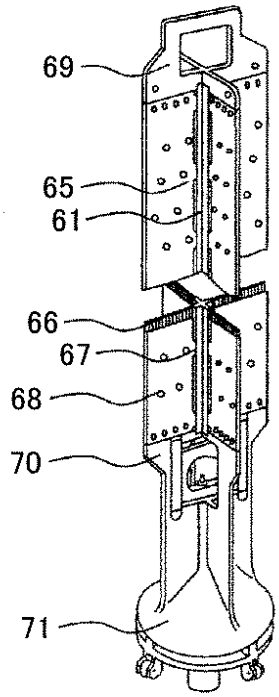
【図６Ａ】

図 6A



【図６Ｂ】

図 6B



フロントページの続き

(72)発明者　井上　亮
東京都千代田区丸の内一丁目６番６号　株式会社日立製作所内
(72)発明者　張　旭東
東京都千代田区丸の内一丁目６番６号　株式会社日立製作所内

審査官　岡▲崎▼　輝雄

(56)参考文献　特開２００７－２５６０３５（ＪＰ，Ａ）
特開２０１５－１５５１１０（ＪＰ，Ａ）
特開２００７－０００８９７（ＪＰ，Ａ）
特開２０１５－０３１６１９（ＪＰ，Ａ）
特開２０１２－２００７７８（ＪＰ，Ａ）
特開２０１４－１８１３８３（ＪＰ，Ａ）
特開２０１５－１２０１８８（ＪＰ，Ａ）
特開２０１４－１１３５９８（ＪＰ，Ａ）
特開２０１０－１４９１６０（ＪＰ，Ａ）
特開平０２－１７３４９３（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２００７／０２２４７６８（ＵＳ，Ａ１）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ２１Ｃ　　７／１０
Ｂ２３Ｋ　２６／０７３
Ｂ２３Ｋ　２６／１２
Ｂ２３Ｋ　２６／２１