

(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2018-102486

(P2018-102486A)

(43) 公開日 平成30年7月5日(2018.7.5)

(51) Int.Cl.
A61N 5/10 (2006.01)

F I
A61N 5/10 N

テーマコード(参考)
4C082

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2016-250604 (P2016-250604)
(22) 出願日 平成28年12月26日 (2016.12.26)

(71) 出願人 301032942
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(74) 代理人 100135781
弁理士 西原 広徳
(72) 発明者 丹正 亮平
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内
(72) 発明者 古川 卓司
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内

最終頁に続く

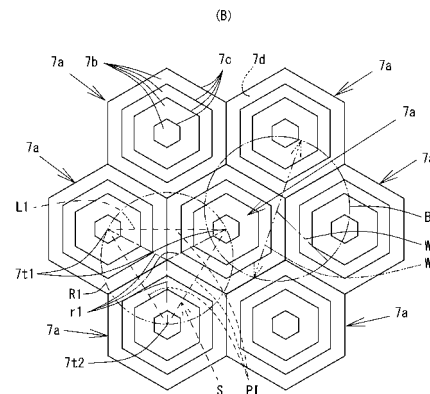
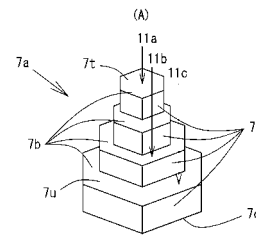
(54) 【発明の名称】 エネルギー変調装置及びこれを用いた粒子線治療装置

(57) 【要約】

【課題】ビームサイズの小さな荷電粒子ビームをスキャニング方式により照射し照射標的への線量集中性を向上させる粒子線治療装置及びそれに用いるエネルギー変調装置を提供する。

【解決手段】加速器1から取り出した荷電粒子ビームをビーム輸送ライン2で輸送し走査電磁石4,5を用いてスキャニング方式により照射する粒子線治療装置10に用いるリッジフィルタ7であって、側面7cに階段状のステップを有する単位構造体7aを複数備え、前記単位構造体7aは同一方向を向き、且つ底面7dを隣接させて同一平面状に稠密に配置され、前記単位構造体7aの配置間隔PIはスキャニングされる前記荷電粒子ビームのビームサイズWより小さく構成されている。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

加速器から取り出した荷電粒子ビームをビーム輸送ラインで輸送し走査電磁石を用いてスキャン方式により照射する粒子線治療装置に用いるエネルギー変調装置であって、基部から頂点部に向かって断面積が段階的に小さくなる単位構造体が同一平面上に基部底面を位置させて複数整列配置され、隣接する前記単位構造体の前記頂点部の間隔が前記単位構造体に入射する前記荷電粒子ビームのビームサイズ以下の間隔で配置されたエネルギー変調装置。

【請求項 2】

一列に整列する前記単位構造体の隣合う 2 つの前記頂点と、次列の前記単位構造体の各前記頂点が、前記隣り合う 2 つの頂点間を底辺とする二等辺三角形または正三角形となる位置に配置された請求項 1 記載のエネルギー変調装置。

【請求項 3】

前記単位構造体は、少なくとも基部の底面が正六角形に形成され、八ニカム状に配置されている請求項 1 または 2 記載のエネルギー変調装置。

【請求項 4】

前記複数の単位構造体は、稠密に整列配置されており、前記二等辺三角形又は正三角形をなす各頂点間の距離は、当該二等辺三角形又は正三角形の外接円の経が前記荷電粒子ビームのビーム経以下になるように構成されている請求項 2 記載のエネルギー変調装置。

【請求項 5】

荷電粒子ビームを加速する加速器と、前記加速器から取り出した荷電粒子ビームを搬送するビーム輸送ラインと、前記荷電粒子ビームを照射するビーム照射部とを備えた粒子線治療装置であって、前記ビーム照射部に、請求項 1 から 4 の何れかに記載のエネルギー変調装置を備えた粒子線治療装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、陽子線や荷電粒子線を使ったがん等の治療を行う粒子線治療装置及びそれに用いるエネルギー変調装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、癌治療において、陽子線や炭素イオン線を主とする荷電粒子線（荷電粒子ビーム）を加速器から取り出し、この荷電粒子ビームを腫瘍（照射標的）に照射する粒子線照射装置が利用されている。

【0003】

このような粒子線照射装置として、照射する荷電粒子ビームの照射野を X Y 方向に拡大し、この荷電粒子ビームの Z 方向のエネルギー幅を大きくし、コリメータにより照射野を所定形状に絞って照射するブロードビーム方式の粒子線照射システムが提案されている（特許文献 1 参照）。

【0004】

この粒子線照射システムに関して、所定のエネルギー分布を形成するためのエネルギー分布形成装置が提案されている。当該エネルギー分布形成装置は、リッジフィルタ 25 の仮想平面 25 a 上に、第一エネルギー吸収体である棒状体 1 と第二エネルギー吸収体である柱状体 3 が配置されている。棒状体 1 は、その厚さが X 方向に段階的に変化する階段部分を有している。棒状体 1 は、その厚さが X 方向に段階的に変化する階段部分を有してい

10

20

30

40

50

る。このエネルギー分布形成装置により、SOBP (Spread-Out Bragg Peak) 幅の大きな拡大ブラッグカーブを精度良く形成でき製作が容易で製作コストを抑えることができるとされている。そして、このような粒子線照射装置は、リッジフィルタによって調整されたエネルギー分布の荷電粒子ビームを、コリメータで腫瘍の形状に合わせて整えてから照射する。

なお、特許文献 1 の図 1 1 に従来例として示されるように、一般的には棒状体 1 のみを有するリッジフィルタが使用されていることが多い。

【0005】

一方で、粒子線照射装置は、上記特許文献 1 のようなブロードビーム照射方式だけでなく、スキャニング照射方式も利用されている。このスキャニング照射方式の粒子線照射装置は、細い荷電粒子ビームを走査して腫瘍（照射標的）に照射する。

10

【0006】

しかし、上述のエネルギー分布形成装置は、このスキャニング方式の粒子線照射装置でそのまま利用すると、条件によっては照射面内におけるエネルギー幅及び分布が不均一になり得るといった問題点があった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献 1】特開 2010 - 117257 号公報

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

この発明は、上述した問題に鑑み、スキャニング照射方式の粒子線照射装置による荷電粒子ビームをどの位置に照射しても照射標的への線量集中性を向上させる粒子線治療装置及びそれに用いるエネルギー変調装置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】

【0009】

この発明は、加速器から取り出した荷電粒子ビームをビーム輸送ラインで輸送し走査電磁石を用いてスキャニング方式により照射する粒子線治療装置に用いるエネルギー変調装置であって、基部から頂点部に向かって断面積が段階的に小さくなる単位構造体が同一平面上に基部底面を位置させて複数整列配置され、隣接する前記単位構造体の前記頂点部の間隔が前記荷電粒子ビームのビームサイズ以下の間隔で配置されたエネルギー変調装置であることを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0010】

この発明により、スキャニング照射方式の粒子線照射装置による荷電粒子ビームをどの位置に照射しても照射標的へのエネルギー幅及び分布均一性を保持した線量集中性を向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

40

【図 1】粒子線治療装置の構成図。

【図 2】照射部の構成図。

【図 3】リッジフィルタの構成を説明する説明図。

【図 4】相対線量の深さ方向（照射方向）分布を示す分布図。

【図 5】ビームサイズと単位構造体間隔による線量均一性を示すグラフ図。

【図 6】第 2 ～ 第 4 実施例の単位構造体の構成を説明する説明図。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、本発明の一実施形態を図面と共に説明する。

【実施例 1】

50

【0013】

< 粒子線治療装置 >

図1は、粒子線治療装置10の概略構成を示す構成図である。

粒子線治療装置10は、加速器1と、ビーム輸送ライン2と、照射部3により主に構成されている。

【0014】

加速器1は、イオン源から取り出された荷電粒子ビームを各種の電磁石、高周波加速装置などによって加速する。

ビーム輸送ライン2は、真空ダクト、四極電磁石2a、及び偏向電磁石2bなどで構成され、加速器1から取り出された荷電粒子ビームを輸送する。

10

【0015】

ビーム輸送ライン2の末端には、照射部3が設けられている。

これにより、イオン源から取り出された荷電粒子ビームは、加速器1で加速された後、ビーム輸送ライン2を介して、照射部3に輸送される。

【0016】

< 照射部 >

図2は、照射部3の構成図である。

照射部3に輸送された荷電粒子ビームは、ガウス分布に従う粒子数分布を有し、ビームサイズWは、ガウス分布の半値全幅(FWHM)で定義される。このビームサイズWは、最小ビームサイズを3mm未満とすることができ、最小ビームサイズを2mm以下とすることが好ましい。

20

【0017】

照射部3は、荷電粒子ビームのXY方向(荷電粒子の進行方向に対する垂直平面方向)の位置を制御するXY方向走査部として機能するX方向走査電磁石4aおよびY方向走査電磁石4bと、荷電粒子ビームのXY方向の位置検出を行うビーム位置モニタ5bと、照射スポットSPごとの荷電粒子の照射線量を計測する線量モニタ5aと、荷電粒子のZ方向(荷電粒子の進行方向)の停止位置(深さ方向となるビーム飛程)を制御するエネルギー変更部6(レンジシフタ)と、停止する荷電粒子の深さ方向の幅Dを制御するリッジフィルタ7(エネルギー変調装置)と、を備えている。なお、荷電粒子のZ方向の停止位置は、エネルギー変更部6だけでなく、加速器1(図1参照)の出射ビームエネルギーの変更によっても制御される。

30

【0018】

この構成により、照射部3は、停止する荷電粒子の深さ方向の幅DとビームサイズWとで定義される照射スポットSPに荷電粒子を照射し、そして、各照射スポットSPの3次元位置を制御する。

【0019】

そして、照射部3は、線量モニタ5aにより計測されたある照射点に照射された照射線量が、当該照射点に対する設定値に達すると、X方向走査電磁石4aやY方向走査電磁石4bを制御し、加えてエネルギー変更部6の変更、あるいは加速器1の出射ビームエネルギーの変更を行う。これにより、荷電粒子ビームの照射位置を次の照射点まで走査することができる。尚、次の照射点に走査される荷電粒子ビームの照射位置はビーム位置モニタ5bにより監視される。

40

【0020】

このようにして、照射部3は、荷電粒子ビームを3次元的に走査(スキャン)して、照射標的となる腫瘍の形状に合わせて3次元的に配置した各照射スポットSPに荷電粒子を次々に照射していく。

【0021】

< エネルギー変調装置(リッジフィルタ) >

図3(A)は、リッジフィルタ7を構成する底面7dが正六角形の錐体である単位構造体7aを模式的に示す斜視図であり、図3(B)は、当該単位構造体7aを同一平面状に

50

稠密に配置したリッジフィルタ 7 の一部を荷電粒子ビームの進行方向から見た平面図である。

【0022】

リッジフィルタ 7 は、単位構造体 7 a を一つのユニットとして、当該単位構造体 7 a を 2 次元的に周期的に配置した 2 次元周期構造を有する。図 3 (B) では、7 つの単位構造体 7 a を図示しているが、実際にはさらに多くの単位構造体 7 a がこの配置で稠密に配置されてリッジフィルタ 7 が構成されている。

【0023】

単位構造体 7 a は、辺の長さが徐々に短くなり面積も小さくなる相似形の複数の正六角柱 7 b を、中心軸を一致させ、且つ側面の向きを揃えて基部 7 u から頂点 7 t 7 に向かって順に重ねた錐形の構造になっている。1 つの正六角柱 7 b における各側面 7 c (平面視における各辺) の大きさ及び形状は同一である。この実施例では、正六角柱 7 b が 4 つ重ねられており、4 つの正六角柱の辺の長さは一定の割合で短くなっており、また、4 つの正六角柱 7 b は、いずれも同じ高さで各平面 (荷電粒子ビームが照射される照射面) が互いに平行になっているが、これらに限定されるものではない。言い換えると、単位構造体 7 a は、底面 7 d が正六角形であり、側面 7 c に階段状のステップを有する錐体になっている。各正六角柱 7 b は、求める荷電粒子ビームによるピークの形状に合わせて、上面 (荷電粒子ビームが照射される照射面) の面積と高さ (荷電粒子ビームが照射される方向の段差) が定められている。

10

【0024】

リッジフィルタ 7 は、複数の単位構造体 7 a の集合体であり、各単位構造体 7 a が同一方向 (図中では Z 軸方向) を向き、且つ荷電粒子ビームの進行方向 (図中では Z 軸方向) に垂直な同一平面内に、底面 7 d を隣接させて稠密に配置されている。ここでは、隣接する各単位構造体 7 a は、最下に位置する正六角柱 7 b の 1 つの側面同士が当接するように八二カム状に配置されている。さらに言えば、単位構造体 7 a は、等間隔かつ稠密に一列に配置された列が多数平行配置されており、かつ、1 列ずつ互い違いに単位構造体 7 a の頂点 7 t の位置が隣接する列の単位構造体 7 a の各頂点 7 t の間に位置するように配置されている。これにより、一列に整列する前記単位構造体 7 a の隣合う 2 つの頂点 7 t 1 と、次列の前記単位構造体の各前記頂点 7 t 2 が、前記隣り合う 2 つの頂点 7 t 1 , 7 t 1 間を底辺 L 1 とする二等辺三角形の一種である正三角形 S となる位置に配置されている。

20

30

【0025】

そして、各単位構造体 7 a は、それぞれの頂点 7 t (7 t 1 , 7 t 2) の間隔が入射する荷電粒子ビーム B のビームサイズ W 以下の間隔で配置されている。さらに言えば、上述した 3 つの頂点 7 t 1 , 7 t 1 , 7 t 2 で構成される正三角形 S の外接円 R 1 の半径 r 1 が、照射される荷電粒子ビーム B のビーム半径 W a 以下になるように構成されている。これにより、この三角形を構成する 3 つの頂点 7 t 1 , 7 t 1 , 7 t 2 の全てを荷電粒子ビーム (スポットビーム) の照射領域外 (スポット外) に位置させることができず、少なくとも 1 つの頂点 7 t が荷電粒子ビームの照射領域内 (スポット内) に位置することが実現されている。なお、この明細書で言うビームサイズ W は、リッジフィルタ 7 に入射する時点での荷電粒子ビーム B のビームサイズ W、すなわち、リッジフィルタ 7 の頂点 7 t に荷電粒子ビーム B が入射する時点での荷電粒子ビーム B のビームサイズ W を指す。

40

【0026】

このようにして、各単位構造体 7 a は最密に配置されているため、所定のビームサイズ W の荷電粒子ビームが照射する照射領域内に充填可能な単位構造体 7 a の数を最大にすることができる。

【0027】

尚、リッジフィルタ 7 は、当該単位構造体 7 a を一つのユニットとした 2 次元周期構造となっており、そして、隣接する単位構造体 7 a の配置間隔 P I (頂点間隔) が、その周期間隔となっている。尚、任意の単位構造体 7 a に隣接する 6 つの単位構造体 7 a は、全て辺が隙間なく接続されており、それぞれの頂点間の配置間隔 P I はすべて同じ配置間隔

50

PIとなっている。

【0028】

以上の構造により、単位構造体7aの配置間隔PIに対する荷電粒子ビームBのビームサイズ比を1以上にすることができ、リッジフィルタ7に入射する荷電粒子ビームの中心軸が単位構造体7aのどの部分を通るかに依存せずに、ほぼ同一の線量分布を得ることができる。詳細については後述する。

【0029】

なお、リッジフィルタ7の材質は、アルミまたはアクリル等の適宜の素材が用いられる。

【0030】

<線量分布に対するビームサイズ及び配置間隔の影響度合い>

図4は、リッジフィルタ7に入射する荷電粒子ビームBの中心位置と、そのときのビーム軸方向の線量部分の関係を示すグラフであり、縦軸を線量、横軸を深さとしている。なお、この縦軸の線量は、深さ0のときの線量を1として規格可した値である。このグラフは、リッジフィルタ7に荷電粒子ビームが入射する場合、荷電粒子ビームの中心軸が単位構造体7a内の異なる3つの点11a, 11b, 11c(図3(A)参照)を通る場合があると仮定して計算した、それぞれの荷電粒子ビームの進行方向(深さ方向)の線量分布12a, 12b, 12cを示している。

【0031】

計算に際して、荷電粒子ビームは、ガウス分布に従う粒子数分布を有し、ビームサイズWは、ガウス分布の半値全幅(FWHM)で、単位構造体7aの配置間隔PI(図3参照)の0.68倍であると仮定している。尚、計算により導出された線量分布は、荷電粒子ビームがリッジフィルタ7に入射した場合の水中での線量分布を示している。

【0032】

図4から、荷電粒子ビームの進行方向(深さ方向)の線量分布は、その中心軸が通る点(11a, 11b, 11c)の位置により違いがあるのがわかる。中心軸が単位構造体7aの頂点7t(11a)に位置する場合、単位構造体7aの厚い部分を荷電粒子ビーム中の粒子の多くが通過するため、エネルギー損失が大きく、線量分布は全体的に浅い方向にシフトし、且つ線量分布の幅が小さくなっている。他方、中心軸が単位構造体7aの底面7dに近い基部側の点(11c)に位置する場合には、単位構造体7aの薄い部分を荷電粒子ビーム中の粒子の多くが通過するため、エネルギー損失が小さく、線量分布は全体的に深い方向にシフトし、且つ線量分布の幅が大きくなっている。そして、中心軸が点(11a)と点(11c)との中間点に相当する点(11b)に位置する場合には、線量分布の深さ方向の全体的な位置、及び線量分布の幅は、中心軸が点(11a)及び点(11c)に位置する上述の場合の中間的な値を示している。

【0033】

図5は、ビームサイズW(FWHM)で規定された荷電粒子ビームの照射領域に含まれる単位構造体7aの数と、深さ方向の線量均一性との関係を示した図である。横軸は、単位構造体7aの配置間隔PIに対するビームサイズW(FWHM)の比率とし、リッジフィルタ7に入射する荷電粒子ビームが照射する照射領域内に充填することが可能な単位構造体7aの数を間接的に表している。縦軸は、以下の[数1]に示すChi square(χ^2)の値とし、リッジフィルタ7を通過することで形成される深さ方向の線量分布の均一性を表している。

【0034】

【数1】

$$\chi^2 = \sum_z \frac{(\text{Calc.}(z) - D\text{sgn}(z))^2}{D\text{sgn}(z)}$$

10

20

30

40

50

ここで、 $Calc.(z)$ は、あるビームサイズで計算した深さ z における線量分布の計算値であり、 $Dsgn(z)$ は、同じ深さ z における線量分布の設計値である。

【0035】

横軸は、ビームサイズを頂点 t 7 間のピッチで除算した値を示している。この値は、ピッチサイズ 1.73 mm のリッジフィルタに対して複数のビームサイズ条件で計算した結果である。

【0036】

図中のエラーバーは、リッジフィルタ 7 に入射する荷電粒子ビームの中心軸が単位構造体 7 a 内の様々な点を通ることに起因したバラツキを示している。横軸の値が 1 より大きい場合には、縦軸の 2 の値はほぼ一定となっており、計算値の設計値からの乖離がビームサイズに依存していないことを意味している。他方、横軸の値が 1 より小さくなると、縦軸の 2 の値、及びエラーバーが大きくなっている。これは、ビームサイズ W が単位構造体 7 a の配置間隔 PI より小さくなると、計算値の設計値からの乖離が大きくなり、加えてリッジフィルタ 7 に入射する荷電粒子ビームの中心軸が通る単位構造体 7 a 内の位置に依存して線量分布の変化が大きくなることを意味している。

10

【0037】

以上のことから、リッジフィルタ 7 に入射する荷電粒子ビームのビームサイズ W や入射位置に依存した変化が小さい線量分布を実現するためには、単位構造体 7 a の配置間隔 PI に対するビームサイズ W の比率を 1 以上にする必要がある。言い換えれば、単位構造体 7 a の配置間隔 PI は、ビームサイズ W より小さくする必要のあることがわかる。

20

【0038】

以上の構成及び動作により、ビームサイズ W を小さくした場合でも、リッジフィルタ 7 を構成する単位構造体 7 a の配置間隔 PI をビームサイズ W より小さく設定することにより、荷電粒子ビームの入射位置に依存したエネルギー変調の変動を抑制することができる。これにより、荷電粒子ビームが走査（スキャニング）され、リッジフィルタ 7 の任意の場所を通過した荷電粒子は、各照射スポット SP において、深さ方向の線量分布に大きな変動を与えることなく照射できる。

【0039】

また、深さ方向に連なる照射スポット SP の連結部分に不均一な線量分布が生じる恐れが小さくなる。すなわち、リッジフィルタ 7 を通過する荷電粒子ビームの粒子群の混ざり合いが促進され、照射標的内の線量分布不均一性を抑えることができる。これにより、照射ポート（照射部 3）の短縮化を実現でき、粒子線治療装置 10 を小型化することができる。

30

【0040】

また、リッジフィルタ 7 が最低限持つべき単位構造体 7 a の密度が明らかになることで、単位構造体 7 a の小型化に対する工作精度の過度な要求を抑えることができる。

【0041】

単位構造体 7 a の配置間隔 PI をビームサイズ W より小さくすることで、荷電粒子ビームが照射するリッジフィルタ 7 の照射領域内（特に荷電粒子ビームの進行方向に垂直な面内）での粒子群の混ざり合いが促進される。これにより、各照射スポット SP における、荷電粒子ビームの進行方向に垂直な面内の線量分布の均一化が図れる。

40

【0042】

また、リッジフィルタ 7 から照射標的までの距離を過度に大きくとる必要がなく、粒子線治療装置 10 の小型化にも役立つ。

【0043】

尚、ビームサイズ W を小さくした場合、単位構造体 7 a の配置間隔 PI を、そのビームサイズ W より小さくなるようにすればよく、単位構造体 7 a の小型化のために、過度な工作精度は必要とされない。

【実施例 2】

【0044】

50

図6(A)は、実施例2のリッジフィルタ17を荷電粒子線ビームの進行方向から見た模式図である。

【0045】

リッジフィルタ7は、単位構造体17aを一つのユニットとして、当該単位構造体17aを2次元的に周期的に配置した2次元周期構造を有する。リッジフィルタ7は、側面17cに階段状のステップを有する底面17dが正方形の錐体である単位構造体17aが、底面17dを隣接させて同一平面状に稠密に配置されている。

【0046】

図6(A)に示すように、単位構造体17aは、辺の長さが徐々に短くなる複数の正四角柱17bを、中心軸を一致させ、且つ側面の向きを揃えて順に重ねた錐形の構造であってもよい。ここでは、正四角柱17bが4つ重ねられており、4つの正四角柱の辺の長さは一定の割合で短くなっており、また、4つの正四角柱17bの高さ(図中のZ方向)は、どれも同じになっているが、これらに限定されるものではない。言い換えると、単位構造体17aは、側面17cに階段状のステップを有する底面17dが正四角形の錐体であってもよい。

10

【0047】

そして、リッジフィルタ17は、各単位構造体17aを同一方向(図中ではZ軸方向)に向け、且つ荷電粒子ビームの進行方向(図中ではZ軸方向)に垂直な同一平面内に、底面17dを隣接させて稠密に配置させて構成するようにしてもよい。ここでは、任意の単位構造体17aに隣接する左右(図中のX方向)の単位構造体17aは、各々1つで、最下に位置する正四角柱17bの1つの側面同士が当接するように配置されている。一方、任意の単位構造体17aに隣接する前後(図中のY方向)の単位構造体17aは、各々2つで、最下に位置する正四角柱17bの1つの側面同士が当接するように配置されている。

20

【0048】

ここでは、左右に隣接する単位構造体17aの配置間隔は、どれも配置間隔 $P I_x$ で同じであり、また、前後に隣接する4つの単位構造体17aとの配置間隔は、どれも配置間隔 $P I_y$ で同じになっているが、配置間隔 $P I_x$ と配置間隔 $P I_y$ とは同じにはなっていない。しかしながら、前後に隣接する単位構造体17aを左右方向(図中のX方向)に全体に移動させることで、単位構造体17aの充填密度を変えることなく、配置間隔 $P I_y$ を配置間隔 $P I_x$ に一致させることが可能である。この場合、任意の単位構造体17aに隣接する前後の単位構造体17aは、各々1つになるようにXY両方向に整列して配置される。すなわち、各単位構造体17aは、XY両方向にずれが無いように揃えられて全体として平面視(ビーム照射方向から見て)格子状に配置される。このような場合には、単位構造体17aの配置間隔 $P I$ は、任意の単位構造に隣接する複数の単位構造の配置間隔の中で最も短い配置間隔、ここでは、配置間隔 $P I_x$ を指すものとする。

30

【実施例3】

【0049】

図6(B)は、実施例3のリッジフィルタ27を荷電粒子線ビームの進行方向から見た模式図である。

【0050】

リッジフィルタ27は、単位構造体27aを一つのユニットとして、当該単位構造体27aを2次元的に周期的に配置した2次元周期構造を有する。このリッジフィルタ27は、側面27cに階段状のステップを有する底面27dが正三角形の錐体である単位構造体27aが、底面27dを隣接させて同一平面状に稠密に配置されている。

40

【0051】

図6(B)に示すように、単位構造体27aは、辺の長さが徐々に短くなる複数の正三角柱27bを、中心軸を一致させ、且つ側面の向きを揃えて順に重ねた錐形の構造であってもよい。ここでは、正三角柱27bが4つ重ねられており、4つの正三角柱の辺の長さは一定の割合で短くなっており、また、4つの正三角柱27bの高さ(図中のZ方向)は、どれも同じになっているが、これらに限定されるものではない。言い換えると、単位構

50

造体 27a は、側面 27c に階段状のステップを有する底面 27d が正三角形の錐体であってもよい。

【0052】

そして、リッジフィルタ 27 は、各单位構造体 27a を同一方向（図中では Z 軸方向）に向け、且つ荷電粒子ビームの進行方向（図中では Z 軸方向）に垂直な同一平面内に、底面 27d を隣接させて稠密に配置させて構成するようにしてもよい。

【0053】

ここでは、任意の単位構造 27a の回りには、その最下に位置する正三角柱 27b の 3 つの側面（平面視した二次元三角形の各辺）に対してそれぞれの 1 つの側面（平面視した二次元三角形の辺）が当接するように配置されている 3 つの単位構造 27a と、同じくその最下に位置する正三角柱 27b の 3 つの側面（平面視した二次元三角形の各頂点 27t）に対してそれぞれ 3 つの側面（平面視した二次元三角形の各頂点 27t）が当接するように配置されて隣接する 9 つの単位構造 27a が存在する。そして、任意の単位構造 27a と最隣接の 3 つの単位構造 27a とは、最短の同じ配置間隔 $P I$ で配置されており、ここでは、この最短の配置間隔 $P I$ を配置間隔 $P I$ としている。

10

【実施例 4】

【0054】

図 6 (C) は、実施例 4 のリッジフィルタ 37 を荷電粒子ビームの進行方向から見た模式図である。このリッジフィルタ 37 は、側面 37c に階段状のステップを有する底面 37d が真円形の錐体を正六角形の平面板 37z 上に形成した単位構造体 37a が、前記平面板 37z を隣接させて同一平面状に稠密に配置されている。

20

【0055】

リッジフィルタ 37 は、単位構造体 37a を一つのユニットとして、当該単位構造体 37a を 2 次元的に周期的に配置した 2 次元周期構造を有する。

【0056】

図 6 (C) に示すように、単位構造体 37a は、正六角形の平面板 37z 上に形成され、直径の長さが徐々に短くなる複数の円柱 37b を、中心軸を一致させて順に重ねた錐形の構造になっている。ここでは、正六角形の平面板 37z 上に円柱 37b が 3 つ重ねられており、3 つの円柱 37b の直径の長さは一定の割合で短くなっており、また、3 つの円柱 37b の高さは、何れも同じになっているが、これらに限定されるものではない。言い換えると、単位構造体 37a は、側面 37c に階段状のステップを有する底面 37d が真円形の錐体が正六角形の平面板 37z 上に形成された構造になっている。

30

【0057】

リッジフィルタ 37 は、複数の単位構造体 37a の集合体であり、各单位構造体 37a が同一方向（図中では Z 軸方向）を向き、且つ荷電粒子ビームの進行方向（図中では Z 軸方向）に垂直な同一平面内に、正六角形の平面板 37z を隣接させて稠密に配置されている。ここでは、隣接する各单位構造体 37a は、最下に位置する正六角形の平面板 37z の 1 つの側面同士が当接するようにハニカム状に配置されている。

【0058】

実施例 1 の構成と同様に、各单位構造体 37a は最密に配置されているため、所定のビームサイズ W の荷電粒子ビームが照射する照射領域内に充填可能な単位構造体 37a の数を最大にすることができる。

40

【0059】

尚、リッジフィルタ 37 は、当該単位構造体 37a を一つのユニットとした 2 次元周期構造となっており、そして、隣接する単位構造体 37a の配置間隔 $P I$ が、その周期間隔となっている。尚、任意の単位構造体 37a に隣接する単位構造体 37a は、6 つ存在し、それらとの配置間隔 $P I$ はすべて同じ配置間隔 $P I$ となっている。

【0060】

実施例 2 ~ 4 で示した上述のリッジフィルタ 17, 27, 37 の何れの構成も、実施例 1 で示したリッジフィルタの構成と同様の動作をし、同様の効果を奏する。

50

【 0 0 6 1 】

また、リッジフィルタ 1 7 , 2 7 , 3 7 以外の他の構成及び動作は、上述の実施例 1 と同一であるため、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

【 0 0 6 2 】

なお、本発明は、上述した各実施例 1 ~ 4 に限らず、様々な形態をとることができる。

例えば、単位構造体（単位構造体 7 a , 1 7 a , 2 7 a , 3 7 a ）は、荷電粒子ビームの進行方向に見て相似形となる大きさの異なる複数種類の板状ブロック（正六角柱 7 b , 四角柱 1 7 b , 三角柱 2 7 b , 円柱 3 7 b ）が、基部から頂点部に向けて徐々に小さいものが配置された任意の形状に形成することができる。

10

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 6 3 】

この発明は、ビームサイズの小さな荷電粒子ビームをスキャニング方式により照射する粒子線治療装置及びそれに用いられるエネルギー変調装置に利用することができる。

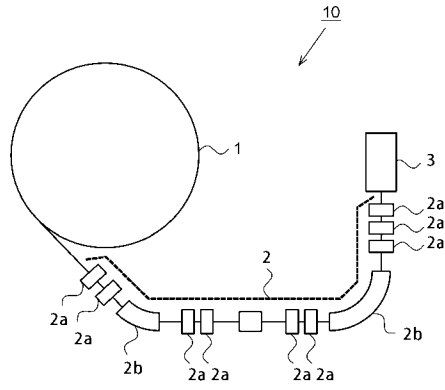
【 符号の説明 】

【 0 0 6 4 】

- 1 ... 加速器
- 2 ... ビーム輸送ライン
- 3 ... 照射部
- 4 a ... X 方向走査電磁石
- 4 b ... Y 方向走査電磁石
- 7 ... リッジフィルタ
- 7 a 、 1 7 a , 2 7 a 、 3 7 a ... 単位構造体
- 1 0 ... 粒子線治療装置
- 3 7 z ... 平面板
- P I ... 配置間隔
- W ... ビームサイズ

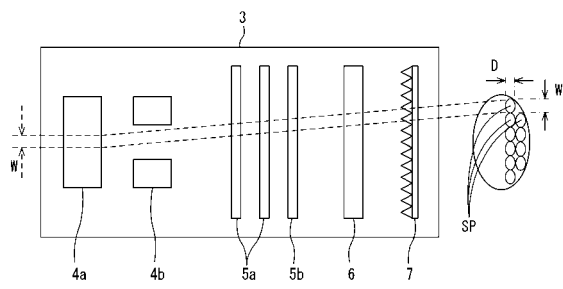
20

【 図 1 】

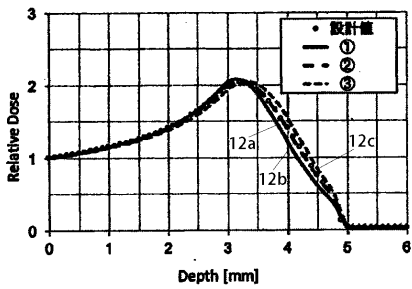


10…粒子線治療装置

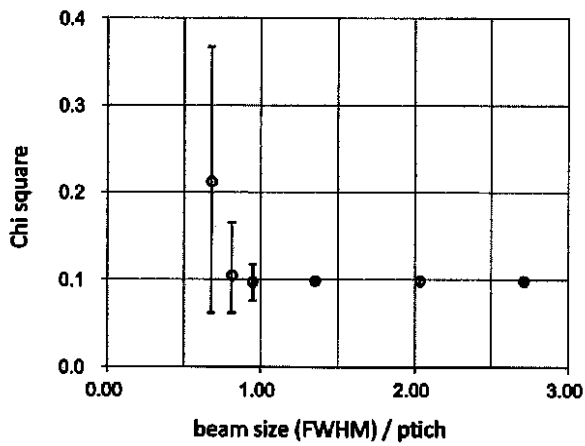
【 図 2 】



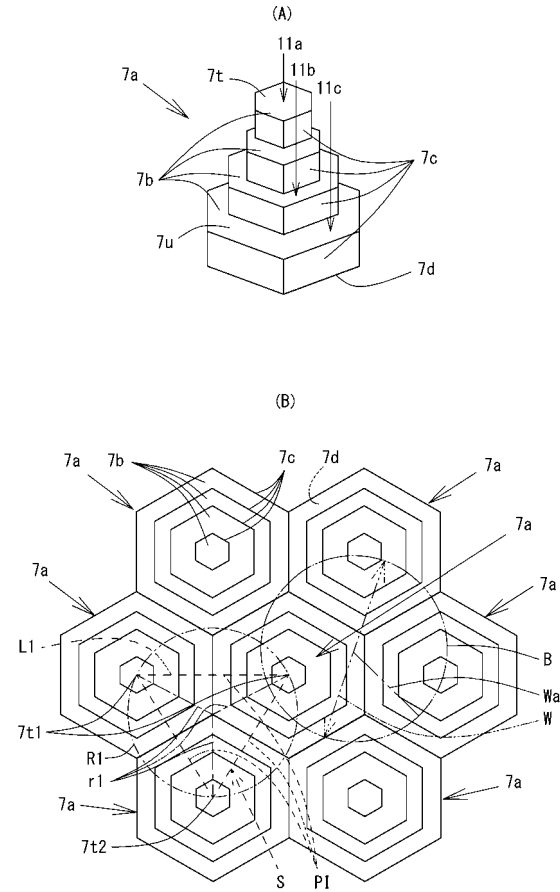
【 図 4 】



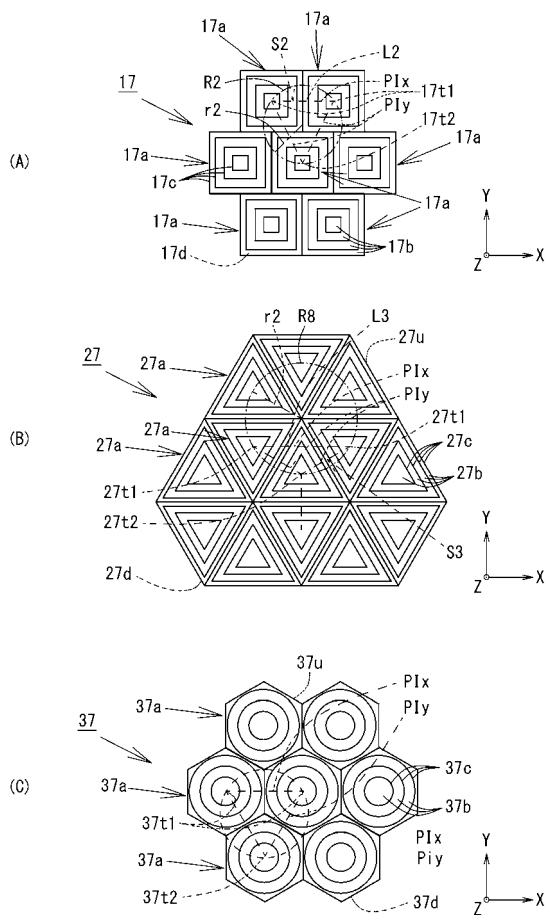
【 図 5 】



【 図 3 】



【 図 6 】



フロントページの続き

特許法第30条第2項適用申請有り 1 平成28年7月3日、University of Jyväskylä, Finland、「Abstract book, 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology」、PA-55 2 平成28年7月5日、「12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology」、Agora of University of Jyväskylä, Mattilanniemi 2 (Building Agora), 40100 Jyväskylä, Finland

(72)発明者 原 洋介

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内
Fターム(参考) 4C082 AA01 AC04 AE01 AG12 AG33