

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6117675号
(P6117675)

(45) 発行日 平成29年4月19日 (2017. 4. 19)

(24) 登録日 平成29年3月31日 (2017. 3. 31)

(51) Int. Cl.

F 1

A 6 1 N 5/01 (2006. 01)
G 2 1 K 5/04 (2006. 01)
G 0 1 T 1/29 (2006. 01)
G 2 1 K 1/093 (2006. 01)

A 6 1 N 5/01 A
 G 2 1 K 5/04 A
 G 0 1 T 1/29 A
 G 2 1 K 1/093 D

請求項の数 5 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2013-219816 (P2013-219816)
 (22) 出願日 平成25年10月23日 (2013. 10. 23)
 (65) 公開番号 特開2015-80594 (P2015-80594A)
 (43) 公開日 平成27年4月27日 (2015. 4. 27)
 審査請求日 平成28年3月8日 (2016. 3. 8)

(73) 特許権者 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 110001829
 特許業務法人開知国際特許事務所
 (74) 代理人 100077816
 弁理士 春日 譲
 (74) 代理人 100156524
 弁理士 猪野木 雄一
 (72) 発明者 青木 孝道
 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

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 粒子線治療装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

患者の患部に荷電粒子ビームを照射する粒子線治療システムであって、
 荷電粒子を加速し、前記荷電粒子ビームとして取り出す加速器と、
 前記荷電粒子ビームを照射点まで輸送するビーム輸送系とを備え、

このビーム輸送系は、

前記照射点とその内部に存在する建屋に対して固定された固定輸送系と、

この固定輸送系の下流に接続された回転輸送系であって、前記建屋に対して回転自在に設置され、前記建屋に対して固定された前記照射点に対してその回転によって前記荷電粒子ビームを照射する角度を回転自在に定める回転輸送系とを有し、

この回転輸送系は、前記荷電粒子ビームを偏向させる複数の偏向部と、この複数の偏向部間を接続し、前記荷電粒子ビームを直進させる複数の直線部とが、前記荷電粒子ビームの軌道上に設置されており、

前記回転輸送系内部において、前記複数の偏向部のうち、一つの偏向部とその直前の直線部と直後の直線部とから構成される平面を、少なくとも3つ以上有し、

前記少なくとも3つ以上の平面のうち、前記固定輸送系に最も近い平面に属する偏向部での前記荷電粒子ビームの総偏向角度が90度未満である

ことを特徴とする粒子線治療システム。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の粒子線治療システムにおいて、

10

20

前記少なくとも 3 つ以上の平面のうち、前記照射点に最も近い平面に属する直線部のうち、最も前記固定輸送系に近い直線部にビームプロファイル測定部を備えたことを特徴とする粒子線治療システム。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の粒子線治療システムにおいて、

前記少なくとも 3 つ以上の平面の各々の交差箇所において、前記荷電粒子ビームの進行方向を軸とする回転作用である捻りを生じさせる

ことを特徴とする粒子線治療システム。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の粒子線治療システムにおいて、

前記少なくとも 3 つ以上の平面のうち、前記照射点に最も近い平面と前記固定輸送系に最も近い平面を除く平面内において、X Y カップリングを生じさせる

ことを特徴とする粒子線治療システム。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の粒子線治療システムにおいて、

前記少なくとも 3 つ以上の平面のうち、前記照射点に最も近い平面と前記固定輸送系に最も近い平面を除く平面内において、前記荷電粒子ビームにおける分散関数 x , y の何れもが 0 でない値をとる箇所を有する

ことを特徴とする粒子線治療システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、陽子線または炭素イオン線等の重イオン線の照射によってがんなどの腫瘍を治療する粒子線治療装置に関する。

【背景技術】

【0002】

がん治療法の一つとして、患部に陽子あるいは炭素イオン等の重イオンのイオンビームを照射する粒子線治療が知られている。

陽子や炭素イオン等のイオンを高エネルギーで物質に入射すると、飛程の終端で多くのエネルギーを失う。粒子線治療では、この性質を利用し、がん細胞で多くのエネルギーを失うように、イオンビームを患者に照射する。すると、周囲の健康な組織への損傷を抑えつつ、がん細胞を破壊できる。粒子線治療ではイオンビームの空間的な広がりエネルギーを調整し、患部の形状に合わせた線量分布を形成する。

【0003】

イオンビームはイオン源で生成したイオンを加速器で加速することで得る。ビームは加速器から輸送装置を経て、照射装置に輸送される。照射装置は患部の形状に合わせた線量分布を形成する。

線量分布の形成方法には、ビームを散乱体に当ててビーム形状を患部形状に一致させる散乱体照射法と、細く絞ったビームを電磁石で患部に沿って走査して患部に線量を付与するスキャニング照射法がある。

いずれの照射法においても、任意の方向からビームを患部へ照射可能とするために、回転ガントリーに照射装置とビームの輸送装置とを搭載することがある。

【0004】

回転ガントリーに搭載可能な輸送装置の電磁石配置には、例えば、特許文献 1 に記載の一平面内にビーム軌道を収めるグースネック型と、特許文献 2 に記載の二つの平面でビーム軌道を形成するコークスクリュー型とがある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開 2006 - 166947 号公報

10

20

30

40

50

【特許文献2】米国特許4,812,658号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

このような粒子線治療装置をさらに普及させるために、装置の小型化、低コスト化等が求められている。

【0007】

しかし、特許文献1に記載したようなグースネック型輸送装置では、任意の方向からビームを照射可能とするための回転駆動機構が非常に大きくなり、設置面積が非常に大きく、装置の小型化が困難であるとの課題があった。

10

【0008】

また、特許文献2に記載したようなコークスクリュー型輸送装置では、設置面積は特許文献1に記載したようなグースネック型に比べて小さくできるものの、ビームの総偏向角が大きく、偏向電磁石の員数の増大や偏向電磁石の大型化を招くとの課題がある。

更には、治療室の設置スペースが非常に狭くなるため、患者に圧迫感を与えてしまうとの課題があった。

【0009】

本発明は、このような課題に対してなされたものであって、従来のコークスクリュー型輸送装置よりもビームの総偏向角度を抑制することができる回転輸送系を備えた粒子線治療装置を提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記課題を解決するために、例えば特許請求の範囲に記載の構成を採用する。

本発明は、上記課題を解決する手段を複数含んでいるが、その一例を挙げるならば、患者の患部に荷電粒子ビームを照射する粒子線治療システムであって、荷電粒子を加速し、前記荷電粒子ビームとして取り出す加速器と、前記荷電粒子ビームを照射点まで輸送するビーム輸送系とを備え、このビーム輸送系は、前記照射点とその内部に存在する建屋に対して固定された固定輸送系と、この固定輸送系の下流に接続された回転輸送系であって、前記建屋に対して回転自在に設置され、前記建屋に対して固定された前記照射点に対してその回転によって前記荷電粒子ビームを照射する角度を回転自在に定める回転輸送系とを有し、この回転輸送系は、前記荷電粒子ビームを偏向させる複数の偏向部と、この複数の偏向部間を接続し、前記荷電粒子ビームを直進させる複数の直線部とが、前記荷電粒子ビームの軌道に設置されており、前記回転輸送系内部において、前記複数の偏向部のうち、一つの偏向部とその直前の直線部と直後の直線部とから構成される平面を、少なくとも3つ以上有し、前記少なくとも3つ以上の平面のうち、前記固定輸送系に最も近い平面に属する偏向部での前記荷電粒子ビームの総偏向角度が90度未満であることを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、従来のグースネック型輸送装置に比べて装置を小型化できるとともに、従来のコークスクリュー型輸送装置よりもビームの総偏向角度を抑制することができる。このため、従来よりも偏向電磁石の員数の低減や小型化が可能であるとともに、更には治療室の設置スペースを広くとることができ、患者に対する心理的負担を従来に比べて軽減することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の粒子線治療システムの実施形態の全体構成を示す図である。

【図2】本発明の粒子線治療システムの実施形態における回転輸送系の平面の概要を説明する概念図である。

【図3】図2のA方向からの矢視図である。

50

【図４】図２のＢ方向からの矢視図である。

【図５】図２のＣ方向からの矢視図である。

【図６】本発明の粒子線治療システムの実施形態におけるビームサイズのふるまいを示す図である。

【図７】本発明の粒子線治療システムの実施形態における分散関数のふるまいを示す図である。

【図８】本発明の粒子線治療システムの実施形態において、回転輸送系を構成する最上流の平面が水平となる場合の平面内の機器配置と回転輸送系のビーム軌道の射影位置関係を示す図である。

【図９】従来の粒子線治療システムに供えられた回転輸送系の構成を示す図である。

【図１０】従来の粒子線治療システムに供えられた回転輸送系におけるビームサイズのふるまいを示す図である。

【図１１】従来の粒子線治療システムに供えられた回転輸送系における分散関数のふるまいを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【００１３】

以下、図面を参照しつつ本発明の実施形態を説明する。

本実施形態は、加速器としてシンクロトロンを用いた粒子線治療システムであり、粒子線として炭素イオンのビームを用いる場合について説明するが、もちろんこれに限定されない。図１には本実施形態の全体構成図を示す。

【００１４】

本実施形態の粒子線治療システム１００は、イオン源２００、入射器３００、シンクロトロン４００、輸送装置（ビーム輸送系）５００、回転ガントリー６００、照射装置７００とを備える。

イオン源２００にて治療用のビームとする炭素イオンを発生させ、入射器３００において核子当たり運動エネルギー７ＭｅＶ／ｕまで予備加速される。その後シンクロトロン４００に予備加速したビームを入射し、その後治療に用いるエネルギーまで加速する。本実施形態の粒子線治療システム１００では、シンクロトロン４００で加速したビームの運動エネルギーは最大４４０ＭｅＶ／ｕである。また、４４０ＭｅＶ／ｕ以下の任意の指定された運動エネルギーのビームを取り出すことができる。

実際の治療時には、患者ごとに作成された治療計画に従って、シンクロトロン４００から取り出されるビームの運動エネルギーは決定される。

シンクロトロン４００から取り出されるビームは、取り出し用偏向電磁石４１０を通過して輸送装置５００に導入される。

【００１５】

輸送装置５００は、建屋に対して固定された固定輸送装置５１０と、回転軸６１０を軸として固定輸送装置５１０に対して回転可能に設けられた回転ガントリー６００とを備えている。この輸送装置５００では、固定輸送装置５１０と回転ガントリー６００に固定された回転輸送系５２０とが直列に接続されている。

回転輸送系５２０の終点は照射点５４０であり、治療時には照射点５４０に患部が位置するように患者をベッドに固定している。この状態でビームを照射することで、治療計画によって定められた線量が患部に付与される。

輸送装置５００内のビーム経路５３０は、真空ポンプによって真空引きされている。経路５３０中には、ビームを偏向させる偏向部５５１、ビームを直進させる直線部で収束あるいは発散させる四極電磁石（不図示）、ビームの形状を測定するプロファイルモニタ６２８等が設置されている。

【００１６】

本システムはスキャニング照射法が可能な照射装置であるため、照射装置７００は、回転ガントリー６００内に設けられている。

この照射装置７００は、ビームの軌道に対して垂直な平面内の直交する二方向（以下、

10

20

30

40

50

まとめて横方向と定義する)に独立にビームが走査させる二台の走査電磁石、ビームモニタ等を備えている。

【0017】

本実施形態の回転輸送系520について、さらに詳細に説明する。

回転輸送系520は、回転ガントリー600の内部に設置されており、回転軸610を軸とした回転ガントリー600の回転とともに、照射点540へのビームの照射方向を変えられるよう回転可能に構成されている。回転輸送系520は三平面でビーム軌道を形成するビーム輸送装置である。

【0018】

回転輸送系520内での様々な電磁石の配置を図2に示す。

10

本実施形態の回転ガントリー600は、6つの偏向部(ビームの上流側より611~616)と7つの直線部(ビームの上流側より621~627)よりなる。

6つの偏向部内には、それぞれ均一磁場を励起し、ビームを偏向させる偏向電磁石がそれぞれ1台ずつ設けられている。

偏向部611、偏向部614および偏向部615でのビーム軌道の偏向条件は、偏向角60度・偏向半径2.2mである。

偏向部612および偏向部613での偏向条件は、偏向角45度・偏向半径2.2mである。

偏向部616での偏向条件は、偏向角75度・偏向半径2.7mである。

【0019】

20

直線部621~627では、ビームは直線の軌道に沿って移動する。この直線部621~627には、ビーム軌道上にはビームの収束発散を行う四極電磁石(不図示)、ビームの横方向形状を測定するプロファイルモニタ(直線部624のみに示したプロファイルモニタ628等)等が設置されている。

直線部621~627の長さは、それぞれ、1.5m・3.5m・2m・1.5m・2m・2.306m・3.694mである。

直線部621~626それぞれには、上流側(直線部621側)から1台・4台・2台・1台・2台・2台の四極電磁石が設置されており、通過するビームサイズを真空ダクト内に抑えるとともに、照射点540におけるビームサイズと分散関数を後述の方法で調整している。

30

直線部527は、照射装置700内を介して照射点540に接続されており、この直線部527には、スキャニング照射のためにビームを軌道に対して垂直な面内で走査するための走査電磁石が2台設置されている。

【0020】

また、本実施形態の回転輸送系520は、その内部において、偏向部611~616のうち、ある偏向部とその直前の直線部と直後の直線部とから構成される平面を、回転輸送系520内の軌道に三個描く。図2において、A方向から見た図を図3に、B方向から見た図を図4に、C方向から見た図を図5にそれぞれ示す。

【0021】

まず、図2乃至図5に示すように、一つ目の平面631は、固定輸送装置510との接続点550から直線部621と偏向部611を経て直線部622までの軌道で構成される。

40

【0022】

次いで、偏向部611の下流にある直線部622から、偏向部612、直線部623、偏向部613、直線部624までのビーム軌道は、2つ目の平面632内にある。

具体的には、偏向部612とその直前の直線部622とその直後の直線部623とで構成される平面と、偏向部613とその直前の直線部623とその直後の直線部624とで構成される平面とは同一平面に存在するため、これらは一つの平面(平面632)となる。

【0023】

50

更に、直線部 6 2 4 から、偏向部 6 1 4 , 直線部 6 2 5 , 偏向部 6 1 5 , 直線部 6 2 6 , 偏向部 6 1 6 , 照射点 5 4 0 を含む直線部 6 2 7 までのビーム軌道は、平面 6 3 1 , 6 3 2 とは別の、3 つ目の平面 6 3 3 内にある。

具体的には、偏向部 6 1 4 とその直前の直線部 6 2 4 とその直後の直線部 6 2 5 とで構成される平面、偏向部 6 1 5 とその直前の直線部 6 2 5 とその直後の直線部 6 2 6 とで構成される平面、偏向部 6 1 6 とその直前の直線部 6 2 6 とその直後の直線部 6 2 7 とで構成される平面の 3 つの平面は同一平面に存在するため、これらは一つの平面 (平面 6 3 3) となる。

【 0 0 2 4 】

第一番目の偏向部 6 1 1 がある平面 6 3 1 と、第二・第三番目の偏向部 6 1 2 ・ 6 1 3 がある平面 6 3 2 との成す角は 0 度より大きく、9 0 度である。 10

また、平面 6 3 2 と、第四～第六偏向部 6 1 4 ～ 6 1 6 がある平面 6 3 3 との成す角は 3 0 度である。

回転ガントリー 6 0 0 の回転軸 6 1 0 は直線部 6 2 1 内のビーム軌道を含み、平面 6 3 1 内にある。さらに照射点 5 4 0 は回転軸 6 1 0 上にあるため、照射点 5 4 0 は平面 6 3 1 と平面 6 3 3 との交線上に存在する。

平面 6 3 1 と平面 6 3 3 との交線と直線部 6 2 7 上のビーム軌道とは直交しており、結果、回転軸 6 1 0 と平面 6 3 3 が直交する。

よって回転ガントリー 6 0 0 の回転角度によって照射点 5 4 0 への照射方向を制御できる。この配置によって、本実施形態においては第一の平面 6 3 1 が水平であるとき、最下流の直線部 6 2 7 は鉛直から 1 5 度傾いた方向となる。 20

【 0 0 2 5 】

次に、本実施形態におけるビーム輸送の方法について述べる。

本実施形態で用いるスキャニング照射法を用いた粒子線治療装置においては、腫瘍外への線量を抑制するにはビームの進行方向に対して垂直な平面内でのビームサイズを小さく抑制することが有効である。

以下ではビームの進行方向に対して垂直な平面内の直交する二方向を選び、X , Y と座標軸を定義する。偏向電磁石中では X 方向を偏向面と平行とし、Y 方向を偏向面に垂直な方向とする。以上の定義に基づき、ビームサイズの調整に必要なビーム光学について述べる。 30

【 0 0 2 6 】

ビームを構成する個々の重粒子が偏向電磁石や四極電磁石や磁場のない真空ダクト内 (以上をまとめて輸送機器と以下では述べる) を通過した際、通過後のビーム位置は輸送行列なる行列を用いて次式 1 のように表せる。

【 0 0 2 7 】

【数 1】

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \delta \end{pmatrix}_f = \mathbf{x}_f = \mathbf{R} \mathbf{x}_i = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \delta \end{pmatrix}_i$$

10

【0028】

但し、数式 1 中の x は設計軌道からの X 方向の位置ずれ、 x' は軌道の傾きずれである。また、 y および y' は設計軌道からの Y 方向の位置ずれと軌道の傾きである。さらに、 δ は基準運動量からのずれである。

20

【0029】

この数式 1 で表される (x, x', y, y', δ) で定義される空間を位相空間と呼び、位相空間上の点を指定するベクトルとして位相空間ベクトル \mathbf{x} が定義できる。下付き添え字の i は機器入射時のビームの状態を表し、下付き添え字の f は機器出射時のビーム状態を表すこととする。

【0030】

上述した数式 1 より、輸送機器に固有の輸送行列 \mathbf{R} を入射時の位相空間ベクトルに掛けることによってビームがその機器を通過した後の位相空間ベクトルが求めることができる。すなわち輸送行列 \mathbf{R} が収束・発散の効果をあらわす。

30

【0031】

輸送行列 \mathbf{R} の例として磁場のない直線部と偏向電磁石と四極電磁石の輸送行列をそれぞれ \mathbf{R}_D , \mathbf{R}_{BM} , \mathbf{R}_{QM} と定義すると、その成分はそれぞれ次式 2 - 4 のように表すことができる。

【0032】

【数 2】

$$\mathbf{R}_D = \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

40

【0033】

【数 3】

$$\mathbf{R}_{\text{BM}} = \left(\begin{array}{cc|cc|c} \cos \alpha & \rho \sin \alpha & 0 & 0 & \rho(1 - \cos \alpha) \\ -\rho^{-1} \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & \sin \alpha \\ \hline 0 & 0 & 1 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad 10$$

【 0 0 3 4 】

【数 4】

$$\mathbf{R}_{\text{QM}} = \left(\begin{array}{cc|cc|c} \cos kL & k^{-1} \sin kL & 0 & 0 & 0 \\ -k \sin kL & \cos kL & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \cosh kL & k^{-1} \sinh kL & 0 \\ 0 & 0 & k \sinh kL & \cosh kL & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad 20$$

ただし数式 2 4 中の L は各輸送機器中のビームの設計軌道の長さであり、 α は偏向電磁石の偏向角である。k は四極電磁石における収束力の強さを表す量であり、次式 5 のように定義される。

【 0 0 3 5 】

【数 5】

$$k^2 = -\frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} \quad 30$$

k が虚数になる場合も数式 5 は有効であり、計算の際は適宜三角関数を双曲線関数に置き換えればよい。

【 0 0 3 6 】

ここで、数式 4 中の四極電磁石の輸送行列の (2, 1) 成分と (3, 4) 成分に注目すると、k が実数の場合は X 方向の輸送行列で負となり、Y 方向の輸送行列において正となる。逆に k が純虚数の場合は正負が逆となる。

40

この成分が正の場合はビームを構成する各粒子は変位に比例して変位と同じ方向に力を受ける。そのため、ビーム全体としては発散の作用を受ける。一方負の場合はビームを構成する各粒子が変位とは逆向きに力を受けるので、ビーム全体としては収束の作用を受ける。

【 0 0 3 7 】

同様に、偏向電磁石においては X 方向に収束し、Y 方向は自由空間と同じく収束も発散もしない。

【 0 0 3 8 】

ところで、一般的に、イオンビームのビームサイズ等のパラメータを数学的に表すためには、ビーム位置と傾きの分散共分散行列 (行列と以下では呼ぶ。) を用いる。この

50

行列の定義は次式 6 に示すとおりである。

【 0 0 3 9 】

【 数 6 】

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle & \langle x\delta \rangle \\ \langle x'x \rangle & \langle x'^2 \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle & \langle x'\delta \rangle \\ \langle yx \rangle & \langle yx' \rangle & \langle y^2 \rangle & \langle yy' \rangle & \langle y\delta \rangle \\ \langle y'x \rangle & \langle y'x' \rangle & \langle y'y \rangle & \langle y'y' \rangle & \langle y'\delta \rangle \\ \langle \delta x \rangle & \langle \delta x' \rangle & \langle \delta y \rangle & \langle \delta y' \rangle & \langle \delta^2 \rangle \end{pmatrix} \quad 10$$

行列は実対称行列であり、各成分はビームを構成する粒子に関する位相空間上の位置の積の平均である。

20

例えば、行列の (1 , 1) 成分は X 方向での軌道からのずれの分散であり、(2 , 2) 成分はビームの発散角の分散である。また、(1 , 2) 成分は (1 , 1) 成分の軌道に沿った微分に比例する量であり、ビームサイズの位置変化を表す。ビームサイズは (1 , 1) 成分の二乗根をとればビームの空間的な広がりを表すビームサイズとなる。Y 方向についても同様の議論が成立する。

【 0 0 4 0 】

輸送機器が 行列に与える効果も輸送行列 R によって表現でき、輸送機器に入射する点での 行列を Σ_i 、輸送機器から出射する点での 行列を Σ_f と書くと、両者は次式 7 によって結びつけられる。

【 0 0 4 1 】

30

【 数 7 】

$$\Sigma_f = R \Sigma_i R^T$$

但し、右上添え字の T は転置行列を表す。輸送行列の行列式は 1 であるため、行列の行列式は不変である。

【 0 0 4 2 】

通常の輸送系では、数式 6 において、空間的に直交する位相空間成分同士の共分散 (1 , 3) (1 , 4) (2 , 3) (2 , 4) (3 , 1) (3 , 2) (4 , 1) (4 , 2) 成分は 0 である。

40

しかし本実施形態では、偏向部 6 1 1 , 6 1 2 , 6 1 4 が、直前の直線部における X 方向と Y 方向が互いに異なるように配置されている。従って、偏向部 6 1 1 , 6 1 2 , 6 1 4 の入射点において、ビーム進行方向を軸とする回転に伴う座標変換 (以下、捻り作用と定義する) が必要となる。この座標変換は、次式 8 に示す輸送行列 R_{ROT} として表現することができる。

【 0 0 4 3 】

【数 8】

$$\mathbf{R}_{\text{ROT}} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

10

但し、数式 8 中の θ は変換前後の X 軸の成す角であり、捻り角と定義する。この捻り角は、変換前の X 軸から Y 軸に向かう回転を正とする。

【0044】

このような輸送行列があると、行列の共分散項 (1, 3) (1, 4) (2, 3) (2, 4) (3, 1) (3, 2) (4, 1) (4, 2) 成分も 0 でない値をとりうる。このことを X Y 結合がある状態と定義する。X Y 結合が生じているビームにおいては、X Y 面内におけるビームの空間的形状に傾きがあることになる。

【0045】

20

また、数式 8 の (1, 5) (2, 5) (3, 5) (4, 5) 成分が、数式 6 の運動量ずれとの相関を表すパラメータに対応する。これらの成分は照射点において 0 にすることで、ビームサイズを小さくすることができる。特にこれらの成分と運動量分散である (5, 5) 成分の比を分散関数といい、それぞれ x , x' , y , y' と表す。

分散関数の輸送による変換は数式 7 から導くことができ、次式 9 に表すような変換となる。

【0046】

【数 9】

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta'_x \\ \eta_y \\ \eta'_y \\ 1 \end{pmatrix}_f = \mathbf{R} \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta'_x \\ \eta_y \\ \eta'_y \\ 1 \end{pmatrix}_i$$

30

40

【0047】

ここで、分散関数とその勾配が 0 の時は、数式 9 に記載するように、輸送行列の第 5 列の成分が 0 であるとき分散関数とその勾配が不変である。輸送行列の第 5 列の成分は偏向電磁石のみで値を持つので、イオンビームが直進している際に、直線部上のある点ですべての分散関数が 0 であるならば、その直線部上のあらゆる点で 0 となる特徴を有することが数式 9 からわかる。

また、数式 3 に示すように、イオンビームが、偏向電磁石を通過する際は、X 方向の分散関数にある量が加算されるため、分散関数が 0 のビームが偏向電磁石に入射すると、出射点では X 方向の分散関数が 0 でない値となる。

逆に、直進するイオンビームの分散関数を 0 とするには、直前の偏向電磁石の入射点で

50

はX方向に特定の値の分散関数を持たせることが必要となる。

イオンビームが直進する直線部において0でない分散関数がある場合は、四極電磁石の励磁量を調整することで直線部の出射点における分散関数を調整することができる。

【0048】

以上をまとめると、回転輸送系520内では、四極電磁石の調整により、回転輸送系520での輸送行列を調整し、照射点における行列を設計値に調整することになる。その際、行列の対角成分以外の値を0とすることで、ビームサイズを極小に抑えることができることがわかる。

【0049】

以上の条件を満たす、回転輸送系520における本実施形態における分散関数とビームサイズの振る舞いを図6および図7に示す。

回転輸送系520は、前述の通り全長30.672mの軌道長があり、途中の偏向部611, 612, 614の入射点においてそれぞれ捻り作用が施される。

捻り角はそれぞれ、15度, 90度, -30度である。

【0050】

図6のグラフにおいて、横軸はビーム軌道の進行方向距離、縦軸はビームサイズである。X方向のサイズをひし形でプロットし、Y方向を正立した四角形でプロットしている。図6中のBMは各偏向部中を通過する区間を示しており、点線矢印で示した位置が前述の捻り作用の発生する位置である。

【0051】

同様に、図7に分散関数 x と y の振る舞いを示した。

図7に示すように、分散関数とその勾配が固定輸送装置510との接続点550において0である場合、最初に偏向部611でX方向に分散関数が生じる。

偏向部611を通過したイオンビームは偏向部612に向かうが、ここで、偏向部612におけるXY座標系は、偏向部611に対して、捻り作用によって90度回転した座標系となる。この偏向部612直前の捻り作用によって、 x と y が交換される。すなわち、偏向部612の入射直前で x が0となり、代わりに y が発生する。しかし、直後の偏向部612は、捻り作用が施された後の座標系においてイオンビームをX方向に関して偏向するため、偏向部612の入射直前では0であった x が、偏向部612を通過することによって0でない値を持つこととなる。したがって、この偏向部612の入射点から偏向部614の入射点に至る、平面632内では x と y の両方が0でない値を持つ。すなわち、このa部で示す範囲でXYカプリングが生じていることが分かる。

ここで、照射点540における分散関数を消すために、前述の分散関数の性質から最下流の平面633に入る偏向部614の入射点においてY方向の分散関数とその勾配(それぞれ y と y')を0としなくてはならない。偏向部614は、その下流直線部とその入射点との間である偏向部614内において捻り作用による座標変換があるため、座標変換の前後で式に示すような捻り角-30度に対応する座標変換が分散関数に施される。その際の変換は次式10に示す変換となる。

【0052】

【数10】

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta'_x \\ \eta_y \\ \eta'_y \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/2 & 0 & -1/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & 0 & -1/2 \\ 1/2 & 0 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & \sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta'_x \\ \eta_y \\ \eta'_y \end{pmatrix}_i$$

10

20

30

40

50

【 0 0 5 3 】

このため、この変換によって y と y' が 0 となるためには、次式 1 1 に示す関係が必要である。

【 0 0 5 4 】

【 数 1 1 】

$$\frac{\eta_x}{\eta_y} = \frac{\eta'_x}{\eta'_y} = \sqrt{3}$$

10

【 0 0 5 5 】

なお、輸送系の四極電磁石の調整によってこの数式 1 1 に示す条件を満足させるために、偏向部 6 1 4 の直前にビームサイズの測定が可能なプロファイルモニタ 6 2 8 を設置し、間接的に分散関数を測定できるようにすることで、調整者にとって調整のしやすい体系としている。

【 0 0 5 6 】

プロファイルモニタにおいて、分散関数を測定するには、シンクロトロン 4 0 0 から出射されるビームの運動量を微小量変化させ、運動量変化によって生じるプロファイルモニタ上の位置変化を観測し、それら量の間の比例係数として分散関数を得る。この際に本実施例の回転輸送系 5 2 0 では式 1 1 で示される分散関数の関係を偏向部 6 1 4 の入射点において満たす必要がある。この調整を容易化するために、プロファイルモニタを偏向部 6 1 4 の上流の直線部 6 2 4 に設置し、さらにそのプロファイルモニタは平面 6 3 3 における X 方向と Y 方向のプロファイルを測定できるように設置する。すなわち、直線部 6 2 4 の X 方向と Y 方向に対して 3 0 度傾けてプロファイルモニタを設置する。これにより、偏向部 6 1 4 の入射点において受ける捻りに伴う座標変換を施したあとの分散関数を直接測定できる。すると、このプロファイルモニタで測定される y とその勾配を 0 となるように、上流の四極電磁石の励磁量を調整すればよい。

20

【 0 0 5 7 】

これに対し、従来のコークスクリュウ型の回転輸送装置でのビーム輸送は以下のようになる。従来型のコークスクリュウ型の回転輸送装置は、図 9 に示すように、本発明で定義されるような、偏向部のうち、ある偏向部とその直前の直線部と直後の直線部とから構成される平面を 2 つ有している。

30

具体的には、偏向部 7 1 1 とその直前の直線部 7 2 1 とその直後の直線部 7 2 2 とで構成される平面と、偏向部 7 1 2 とその直前の直線部 7 2 2 とその直後の直線部 7 2 3 とで構成される平面とは同一平目であり、これらの平面で 1 つ目の平面 6 4 1 を構成する。

また、偏向部 7 1 3 とその直前の直線部 7 2 3 とその直後の直線部 7 2 4 とで構成される平面と、偏向部 7 1 4 とその直前の直線部 7 2 4 とその直後の直線部 7 2 5 とで構成される平面と、偏向部 7 1 5 とその直前の直線部 7 2 5 とその直後の直線部 7 2 6 とで構成される平面と、偏向部 7 1 6 とその直前の直線部 7 2 6 とその直後の直線部 7 2 7 とで構成される平面とは同一平目であり、これらの平面で 2 つ目の平面 6 4 2 を構成し、計 2 つの平面を有するのみである。

40

更に、従来型のコークスクリュウ型の回転輸送系では、2 つある平面のうち、最も固定輸送装置 5 1 0 に近い平面である最初の平面 6 4 1 内で 9 0 度ビームを偏向している。このため、X Y カプリングが生じない輸送系となる。そのために、設計や調整が簡単であるものの、照射点 5 4 1 が最上流の偏向部に近接することになる。

【 0 0 5 8 】

このような構成の従来型回転輸送装置 7 2 0 でビーム輸送する場合、横方向のビームサイズを図 1 0 に、分散関数の振る舞いを図 1 1 に示す。

【 0 0 5 9 】

従来型の回転輸送系 7 2 0 においても、平面 6 4 1 と平面 6 4 2 を切り替える偏向部 7

50

13の入射点で捻り作用が働く。ここでの捻り角は90度であるため、分散関数とその勾配は捻りの点において0とすることで、照射点541における分散関数を消去することができる。すると、従来型の回転輸送装置ではY方向の分散関数 y の生じる区間が存在せず、XYカップリングが生じない。

【0060】

本実施形態の回転輸送系520を用いることで、照射点540の周囲の空間を広くとることができる。その原理について図8および図9を参照しつつ述べる。

図8は回転輸送系520を構成する最上流の平面631が水平となる場合の平面631内の機器配置と回転輸送系520のビーム軌道の射影位置542を示す図である。比較のために、従来のコークスクリュー型の回転輸送系のビーム軌道の射影位置543も図8に示す。

10

【0061】

図8に示すように、本実施形態の固定輸送装置510では、最上流の偏向部の偏向角度を90度未満とし、その下流において傾斜した平面内で偏向し、さらに下流において鉛直面内でビームを偏向することによって、照射点540を平面631上に配置し、かつ照射点540の周囲に約2m四方の治療スペース800を確保できていることがわかる。

【0062】

一方、従来型のコークスクリュー型の回転輸送系は、図9に示すように、本発明で定義されるような、偏向部のうち、ある偏向部とその直前の直線部と直後の直線部とから構成される平面を2つ有している。

20

本実施形態で用いる偏向電磁石と同一構成の偏向半径の90度偏向電磁石を用いて従来型のコークスクリュー型の回転輸送系を構成した場合は、図8に示すように、ビーム軌道が、射影位置543のようになり、白抜きの丸で示す位置541に照射点が配置される。

このように照射点が配置される場合、輸送系上の機器との干渉から、治療室の大きさが制限されるため、照射点541の周囲に約1m四方面程度の治療スペース810しか用意することができない。

【0063】

このように、従来のコークスクリュー型回転輸送装置において治療スペースが広くとれないという課題に対して、本実施形態の回転輸送装置を用いればコークスクリュー型の利点である設置面積の小ささを保ちつつ治療スペースを広く確保することが可能である。

30

【0064】

なお、本発明は上記の実施形態に限られず、種々の変形、応用が可能なものである。上述した実施形態は本発明を分かりやすく説明するために詳細に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ない。

【0065】

例えば、上述の実施形態では、偏向部のうち、ある偏向部とその直前の直線部と直後の直線部とから構成される平面が3つの場合について説明したが、3つより多い平面を有するものであってもよい。この場合、少なくとも3つ以上の平面の各々の交差箇所において、荷電粒子ビームの進行方向を軸とする回転作用である捻りを生じさせる、最も固定輸送装置に近い平面と最も照射点に近い平面よりひとつ前の平面以外のその他の平面内で、荷電粒子ビームの進行方向を軸とする回転作用である捻りを生じさせる、XYカップリングを生じさせる、荷電粒子ビームにおける分散関数 x , y の何れもが0でない値をとる箇所を有するように構成することで、上述の実施形態と同様の効果が得られる。

40

【0066】

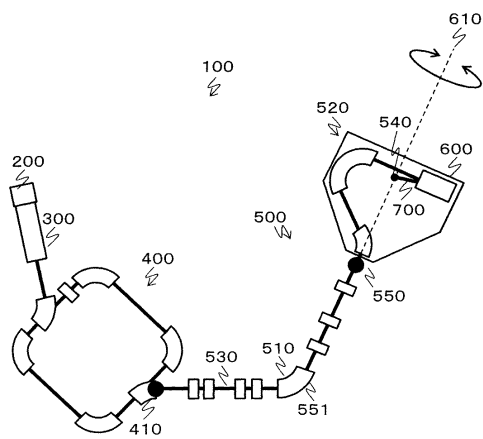
また、3つより多い平面を有する場合において、ビームプロファイルモニタは、照射点に最も近い平面に属する直線部のうち、最も固定輸送系に近い直線部に設置すれば、同様の効果が得られる。

【符号の説明】

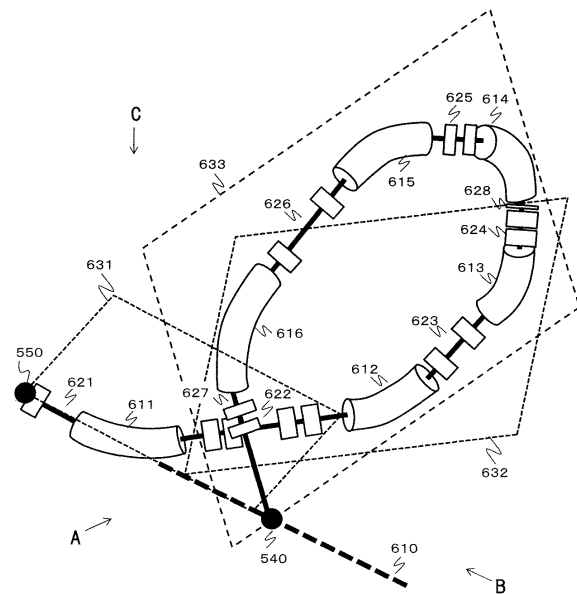
【0067】

- 2 0 0 イオン源
- 3 0 0 入射器
- 4 0 0 シンクロトロン
- 4 1 0 取り出し用偏向電磁石
- 5 0 0 ビーム輸送装置
- 5 1 0 固定輸送装置
- 5 2 0 回転輸送装置
- 5 4 0 ~ 5 4 1 照射点
- 6 0 0 回転ガントリー
- 6 1 0 回転軸
- 6 1 1 ~ 6 1 6 偏向部
- 6 2 1 ~ 6 2 7 直線部
- 6 2 8 ビームプロファイルモニタ
- 6 3 1 ~ 6 3 3 平面
- 7 0 0 照射装置
- 8 0 0 治療スペース

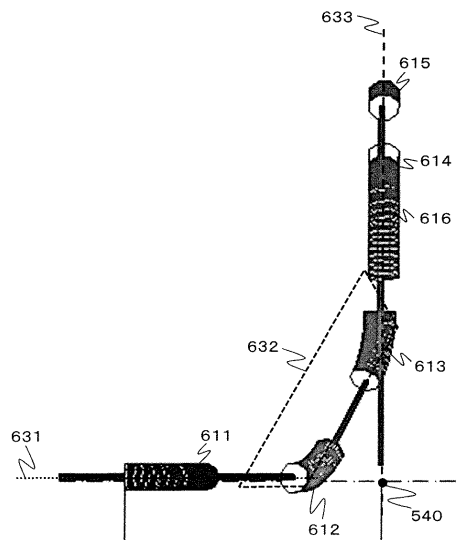
【図 1】



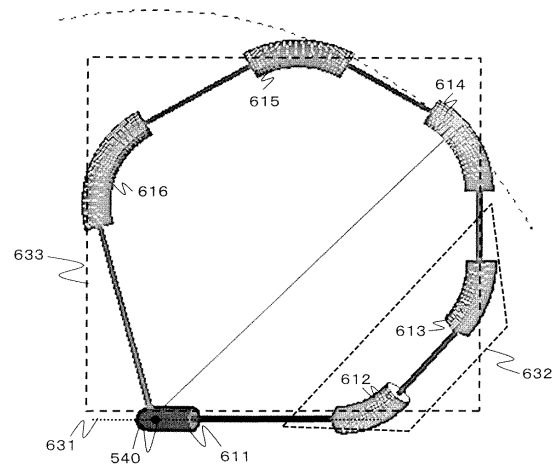
【図 2】



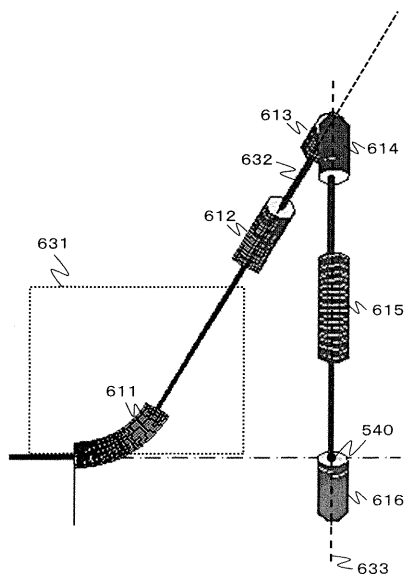
【図 3】



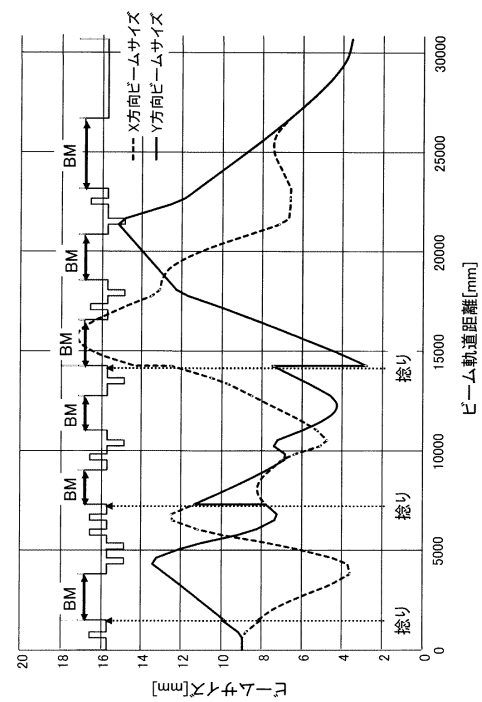
【図 4】



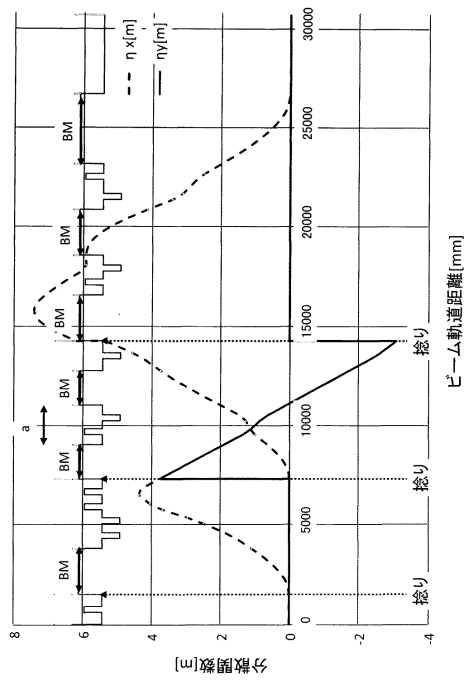
【図 5】



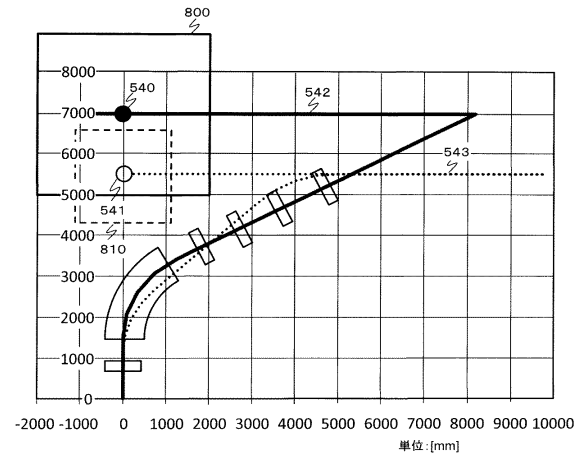
【図 6】



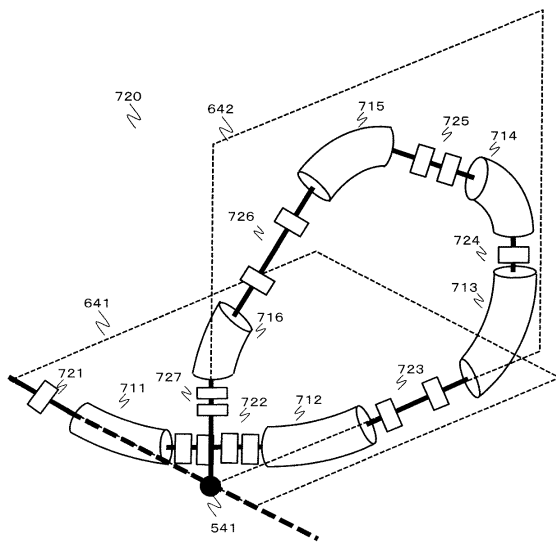
【図 7】



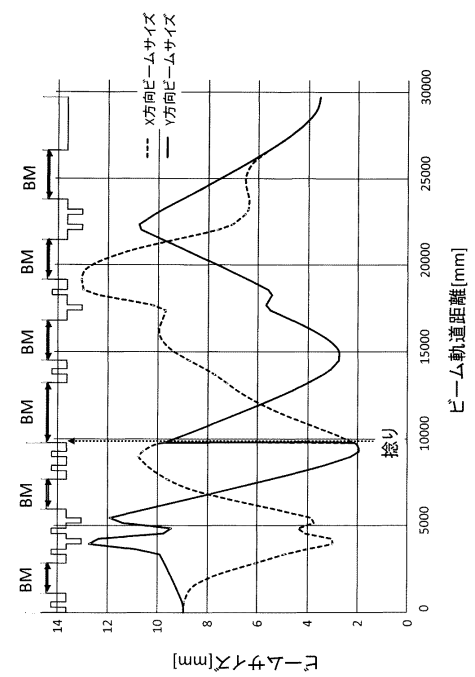
【図 8】



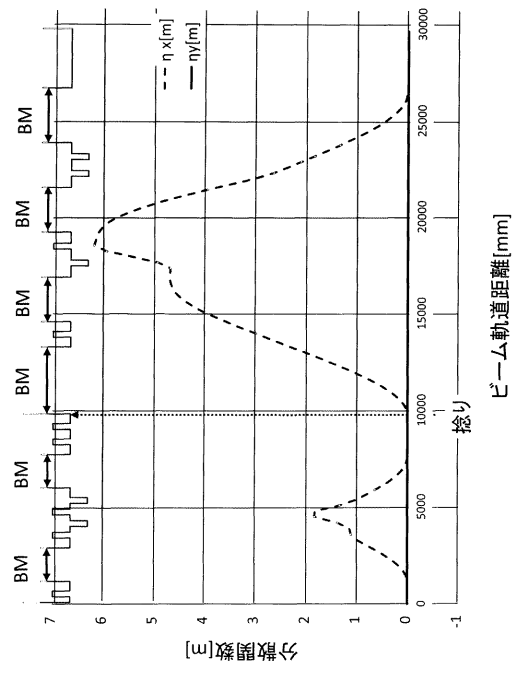
【図 9】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

(72)発明者 野田 文章

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 石田 宏之

(56)参考文献 米国特許第04812658(US,A)

独国特許出願公開第04411171(DE,A1)

特開2013-055989(JP,A)

特開2012-083145(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)

A61N 5/01

G01T 1/29

G21K 1/093

G21K 5/04