

(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2020-38797

(P2020-38797A)

(43) 公開日 令和2年3月12日(2020.3.12)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H05H 7/10 (2006.01)	H05H 7/10	2G085
H05H 13/02 (2006.01)	H05H 13/02	4C082
A61N 5/10 (2006.01)	A61N 5/10	H

審査請求 未請求 請求項の数 15 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2018-165482 (P2018-165482)	(71) 出願人	000005108
(22) 出願日	平成30年9月4日(2018.9.4)		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
		(72) 発明者	羽江 隆光
			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	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

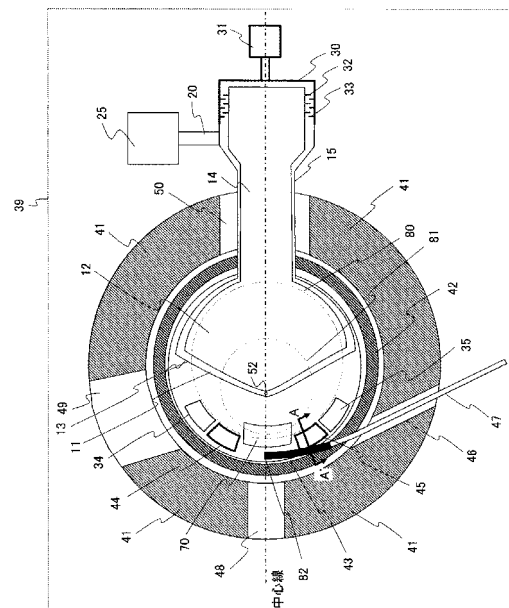
(54) 【発明の名称】 加速器、およびそれを備えた粒子線治療システム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】小型で、かつ可変エネルギーのビームの取出しが可能な加速器とそれを備えた粒子線治療システムを提供する。

【解決手段】周波数変調が可能であり、ビームを加速する加速高周波を印加する加速高周波印加装置と、加速高周波とは周波数が異なり、ビームを取出すための取出し高周波を印加する高周波キッカ70と、2極以上の極数の磁場成分を含み、少なくとも4極磁場成分を含む高次磁場よりなる擾乱磁場領域を形成するピーラ磁場領域44、リジェネレータ磁場領域45と、磁性体のシム、および内周側セプタムコイル導体、外周側セプタムコイル導体、コイル導体接続部、コイル口出し部を有するセプタム電磁石43と、を備えている。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

主磁場、および周波数変調した高周波電場によりビームを加速する周回軌道型加速器であって、

周波数変調が可能であり、前記ビームを加速する加速高周波を印加する加速高周波印加装置と、

前記加速高周波とは周波数が異なり、ビームを取出すための取出し高周波を印加する取出し高周波印加装置と、

2 極以上の極数の磁場成分を含み、少なくとも 4 極磁場成分を含む高次磁場よりなる擾乱磁場領域を形成する擾乱磁場領域形成部と、

磁性体のシム、およびセプトムコイルを有するセプトム電磁石と、を備えたことを特徴とする加速器。

10

【請求項 2】

請求項 1 に記載の加速器において、

前記セプトム電磁石は、前記セプトムコイルに両極性通電する両極性電源を更に有している

ことを特徴とする加速器。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の加速器において、

前記シムは、前記セプトムコイルよりビーム周回軌道外周側に配置された外周側シムにより構成される

20

ことを特徴とする加速器。

【請求項 4】

請求項 2 に記載の加速器において、

前記シムは、前記セプトムコイルよりビーム周回軌道の内周側に配置された内周側シム、および前記セプトムコイルよりビーム周回軌道の外周側に配置された外周側シムにより構成される

ことを特徴とする加速器。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の加速器において、

前記内周側シムは、前記ビームのうち、最大エネルギーのビームの周回軌道に干渉しない楔形の形状である

30

ことを特徴とする加速器。

【請求項 6】

請求項 4 に記載の加速器において、

前記内周側シムおよび前記外周側シムは、互いに接続されることなく独立して配置されている

ことを特徴とする加速器。

【請求項 7】

請求項 4 に記載の加速器において、

前記ビーム周回軌道に対して鉛直方向上方側に配置された上側シム、および前記ビーム周回軌道に対して鉛直方向下方側に配置された下側シムを更に有し、

40

前記内周側シムと前記外周側シムのうち少なくともいずれか一方は前記上側シム、前記下側シムと接続されている

ことを特徴とする加速器。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の加速器において、

前記シムは、積層鋼板コアであり、

前記セプトムコイルは、10 ターン以下のコイルより構成される

ことを特徴とする加速器。

50

【請求項 9】

請求項 1 に記載の加速器において、
加速するビームの入射点が前記加速器の中心より出射側にずれるように前記主磁場により形成される磁場分布を形成し、
前記擾乱磁場領域形成部を、加速中のビーム周回軌道からは外周側に離れた場所に少なくとも 2 箇所以上配置することを特徴とする加速器。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の加速器において、
前記擾乱磁場領域形成部を 2 箇所配置し、
一方の擾乱磁場領域形成部は、前記主磁場が径方向外周側に向けて弱まる磁場勾配を有する第 1 擾乱磁場領域とし、
もう一方の擾乱磁場領域形成部は、前記主磁場が径方向外周側に向けて強まる磁場勾配を有する第 2 擾乱磁場領域とする
ことを特徴とする加速器。

10

【請求項 11】

請求項 10 に記載の加速器において、
前記擾乱磁場領域形成部は、磁性体よりなる磁極片、擾乱磁場形成用コイル、前記磁極片と前記擾乱磁場形成用コイルの双方、のいずれかからなる
ことを特徴とする加速器。

20

【請求項 12】

請求項 1 に記載の加速器において、
前記取出し高周波印加装置は、
前記加速高周波として、取出したいエネルギーのビームの軌道面内、かつ前記ビームの軌道と直交する方向のベータatron振動振幅を増大させる高周波を印加し、
前記取出し高周波の電場振幅、位相、周波数、印加時間のうち少なくともいずれか一つ以上を制御して、取出されるビームパルスの電荷量、および前記ビームパルスの時間構造を制御する
ことを特徴とする加速器。

30

【請求項 13】

請求項 1 に記載の加速器において、
前記加速高周波印加装置による前記加速高周波の印加タイミング、前記取出し高周波印加装置による前記取出し高周波の印加タイミングを制御する演算装置を更に備え、
前記演算装置は、
ビームを所望のエネルギーまで加速したのちに前記加速高周波の遮断を開始し、その後前記取出し高周波の印加を開始し、
前記ビームの取出しが始まる前に前記セプトam電磁石の前記セプトamコイルに励磁電流を通電し、前記取出し高周波の印加を終えた後に前記セプトamコイルの励磁電流を遮断する
ことを特徴とする加速器。

40

【請求項 14】

請求項 13 に記載の加速器において、
前記演算装置は、更に、前記取出し高周波の印加開始後、かつ前記ビームが前記擾乱磁場領域に到達する前に、前記取出し高周波の電場を弱める
ことを特徴とする加速器。

【請求項 15】

請求項 1 乃至 14 の何れか 1 項に記載の加速器と、
前記加速器から取出された特定エネルギーのビームを照射する照射装置と、を備えた
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】

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、加速器と、それを備えた粒子線治療システムに関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献1には、ビームの周回軌道を挟んで一對に設けられ、周方向に交互に配列された複数の凸部と複数の凹部とをそれぞれが有し、凸部同士で挟まれたヒル領域と凹部同士で挟まれたバレー領域とを周回軌道に沿って形成する一對の磁極と、バレー領域に設けられたディー電極と、ディー電極が設けられたバレー領域以外の少なくとも1つのバレー領域においてビームの周回軌道の径方向における外周側に配置され、ビームを加速させるための高周波電場を発生させる高周波発生部と、を備えるサイクロトロンが記載されている。

10

【0003】

また、特許文献2には、エネルギーが異なるイオンビームを効率良く出射できる加速器として、リターンヨークと真空容器を有し、入射用電極が、真空容器の中心軸よりも、リターンヨーク内のビーム出射経路の入口側に配置され、磁極が、リターンヨーク内で入射用電極の周囲において入射用電極から放射状に配置され、凹部が、リターンヨークの周方向で磁極と交互に配置され、真空容器内において、入射用電極を中心とする複数のビーム周回軌道が存在する軌道同心領域、及びこの領域の周囲に、入射用電極から偏心した複数のビーム周回軌道が存在する軌道偏心領域が形成され、軌道偏心領域では、入射用電極とビーム出射経路の入口の間でビーム周回軌道が密になり、入射用電極を基点にしてビーム出射経路の入口の180°反対側でビーム周回軌道相互間の間隔が広がる加速器が記載されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2014-160613号公報

【特許文献2】国際公開第2016/092621号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

30

【0005】

粒子線治療や物理実験などで使用する高エネルギーの原子核ビームは、加速器を用いて生成される。

【0006】

核子当たりの運動エネルギーが200MeV前後のビームを得る加速器には種類がいくつかある。例えば、上述の特許文献1に記載されたようなサイクロトロンや、シンクロトロン、シンクロサイクロトロン、上述の特許文献2に記載されたような可変エネルギー加速器が挙げられる。

【0007】

サイクロトロンおよびシンクロサイクロトロンの特徴は静磁場中を周回するビームを高周波電場で加速する点である。ビームは、加速されるにつれてその軌道の曲率半径を増し、外側の軌道に移動し、最高エネルギーまで到達した後に取出される。そのため、取出すビームのエネルギーは基本的には固定である。

40

【0008】

シンクロトロンはビームを偏向する電磁石の磁場と加速する高周波電場の周波数を時間的に変化させることでビームは一定の軌道を周回する。そのため、設計上の最大エネルギーに到達する前にビームを取出すことも可能であり、取出しエネルギーが可変である。

【0009】

可変エネルギー加速器は、サイクロトロンと同様に、磁場中を周回するビームを高周波電場で加速しながらも、ビーム軌道が加速に伴い一方向に偏心していくことが特徴である

50

。

【 0 0 1 0 】

特許文献 1 に記載のサイクロトロンや特許文献 2 に記載の可変エネルギー加速器は主磁場中を周回するビームを高周波電場で加速する種類の加速器である。軌道上の平均磁場をビームの相対論的ファクターに比例させることで、周回の時間をエネルギーに依らず一定としている。この性質を持つ主磁場分布を等時性磁場と呼ぶ。さて、等時性磁場下では軌道に沿って磁場を変調させることで軌道面内と軌道面に垂直な方向のビーム安定性を確保している。

【 0 0 1 1 】

上述の等時性とビームの安定性を両立するために、主磁場分布には極大部 (H i l l) と極小部 (V a l l e y) が必要である。この分布のついた非一様な磁場は、主電磁石の対向する磁極間の距離 (ギャップ) を H i l l 領域では狭く、V a l l e y 領域では広くとることで形成することができる。

【 0 0 1 2 】

しかしながら、H i l l 磁場と V a l l e y 磁場との差は、実用上は強磁性体である磁極材料の飽和磁束密度程度が限界である。すなわち、H i l l 磁場と V a l l e y 磁場の差は 2 T 程度に制限される。

【 0 0 1 3 】

一方、等時性磁場を用いる加速器を小型化する場合、主磁場を高めて、ビーム軌道の偏向半径を小さくすることが必要である。しかし、主磁場と前述の H i l l 磁場と V a l l e y 磁場の差は比例関係にあり、前述の限界が加速器の現実的な大きさを決める要因となっている。よって上述した特許文献 1 に記載されたようなサイクロトロンや特許文献 2 に記載されたような可変エネルギー加速器には小型化が困難であるという課題があった。

【 0 0 1 4 】

本発明は、小型で、かつ可変エネルギーのビームの取出しが可能な加速器とそれを備えた粒子線治療システムを提供する。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 5 】

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、主磁場、および周波数変調した高周波電場によりビームを加速する加速器であって、周波数変調が可能であり、前記ビームを加速する加速高周波を印加する加速高周波印加装置と、前記加速高周波とは周波数が異なり、ビームを取出すための取出し高周波を印加する取出し高周波印加装置と、2 極以上の極数の磁場成分を含み、少なくとも 4 極磁場成分を含む高次磁場よりなる擾乱磁場領域を形成する擾乱磁場領域形成部と、磁性体のシム、およびセプトラムコイルを有するセプトラム電磁石と、を備えたことを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 6 】

本発明によれば、小型であり、かつ可変エネルギーのビームの取出しが可能な加速器を提供することができる。上記した以外の課題、構成および効果は、以下の実施例の説明により明らかにされる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 7 】

【図 1】本発明の実施例の円形加速器の外観を示す図である。

【図 2】実施例の円形加速器の断面構造を示す図である。

【図 3】実施例の円形加速器の軌道面内における各エネルギーのビーム軌道を示す図である。

【図 4】実施例の円形加速器が備える高周波キッカの断面構造を示す図である。

【図 5】図 4 に示す矢印 B から見たときの高周波キッカの鳥瞰図である。

【図 6】図 2 の A - A' 線上における断面の一例を示す図である。

【図 7】図 6 の直線 r 上における磁場分布図である。

10

20

30

40

50

【図 8】図 2 の A - A ' 線上における断面の他の一例を示す図である。

【図 9】実施例の円形加速器が備えるセプト磁石の断面構造を示す図である。

【図 10】実施例の円形加速器が備えるセプト磁石を構成するセプトコイルの励磁電流と取出しビームエネルギーとの関係を示すグラフである。

【図 11】図 2 の A - A ' 線上における断面の他の一例を示す図である。

【図 12】図 2 の A - A ' 線上における断面他の一例を示す図である。

【図 13】実施例の円形加速器の運転パターンを示す図である。

【図 14】実施例の円形加速器における加速高周波電源、高周波キッカ電源およびセプトコイル励磁電源の制御系ブロック図である。

【図 15】本発明の実施例の粒子線治療システムの全体構成を示す図である。

10

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、図面を用いて本発明の加速器、およびそれを備えた粒子線治療システムの実施例を説明する。尚、下記はあくまでも実施例に過ぎず、発明の内容を下記具体的態様に限定する趣旨ではない。発明自体は、下記実施例以外にも種々の形態に変形させることが可能である。

【0019】

最初に、本発明の好適な一実施例の円形加速器の構造について図 1 乃至図 14 を用いて説明する。

【0020】

本実施例の円形加速器 39 は、一定強度の主磁場 2 (図 9 参照) 中を時間的に周波数変調した高周波電場によって陽子を加速するものであり、その取出しビームのエネルギーは、70 [MeV] - 235 [MeV] と可変となっている。

【0021】

なお、加速する粒子は陽子に限られず、炭素やヘリウム等の重粒子イオンや電子を加速することができる。

【0022】

円形加速器 39 の外観を図 1 に、断面構成を図 2 に示す。

【0023】

図 1 に示すように、円形加速器 39 は、上下に分割可能な主電磁石 40 によってその外殻が形成されており、ビーム加速領域となる内部側は真空引きされている。

30

【0024】

円形加速器 39 の外周部側には、入力カプラ 20 と、回転コンデンサ 30 とが設けられている。円形加速器 39 は、この回転コンデンサ 30 を用いて、高周波加速電圧を周波数変調する。

【0025】

主電磁石 40 の上部にはイオン源 53 が設置されており、低エネルギービーム輸送系 54 を通してビームが円形加速器 39 内部に入射される。イオン源 53 としては、マイクロ波イオン源や ECR イオン源などを適用できる。なお、イオン源は、主電磁石 40 内部の真空引きされたビーム加速領域内部に配置しても良く、その場合は PIG 型イオン源などが適用できる。

40

【0026】

主電磁石 40 は、主磁極 38 (図 6 等参照)、リターンヨーク 41、主コイル 42 等から構成される。

【0027】

リターンヨーク 41 には貫通口が複数あり、そのうち加速されたビームを取出すビーム用貫通口 46、内部のコイル導体を外部に引き出すためのコイル用貫通口 48、真空引き用貫通口 49、高周波加速空洞のための高周波系用貫通口 50 が上下の主電磁石 40 の接続面上に設けられている。

【0028】

50

高周波加速空洞は $\pi/2$ 共振型空洞であり、ディー電極 12、ダミーディー電極 13、外導体 15、入力カプラ 20、回転コンデンサ 30 などより成る。

【0029】

回転コンデンサ 30 は、高周波加速空洞の共振周波数を変調するための機器であり、内導体 14 に連なる固定電極 32、外導体 15 に連なる回転電極 33、モータ 31 等を有している。回転コンデンサ 30 をモータ 31 にて駆動することで固定電極 32 と回転電極 33 の対向部面積が変わるために静電容量が変化し、高周波加速空洞の共振周波数を変えることができる。これにより、周波数変調された加速電圧をディー電極 12 とダミーディー電極 13 との間の加速間隙 11 に発生させることでビームを加速する加速高周波を生成する。

10

【0030】

図 2 に示した加速間隙 11 の形状は、ハーモニクス数 1 の場合を示しており、ビームの軌道形状に応じて形成される。また、回転電極 33 あるいは固定電極 32 の先端形状を変化させることで、ビーム加速に適した共振周波数の変調パターンが得られる。

【0031】

図 2 に示すように、円形加速器 39 の内部には、円環状の主コイル 42 がリターンヨーク 41 の内壁に沿って設置されている。主コイル 42 は、コイル周囲にクライオスタットを設置して超伝導コイルとするが、常伝導コイルも用いることができる。主コイル 42 の内側には主磁極 38 が設置されており、主磁極 38 の表面に設置されるトリムコイル（図示省略）と共にビーム周回や取出しに適した磁場分布を形成する。

20

【0032】

加速するビームの入射点 52 は、円形加速器 39 の中心付近に配置することもできるが、本実施例では、入射点 52 を円形加速器 39 の中心より出射側にずらし、ビーム軌道をコイル用貫通口 48 側に偏心させた場合の構成を示している。

【0033】

このような偏芯軌道の実現方法を説明する。

【0034】

各エネルギーの軌道を図 3 に示す。図 3 では周回軌道は最大エネルギー 235 [MeV] から磁気剛性率 0.04 [Tm] おきに 50 種類のエネルギーの軌道を実線で示している。点線は各軌道の同一の周回位相を結んだ線であり、等周回位相線と呼ぶ。等周回位相線は集約領域から周回位相 $\pi/20$ ごとにプロットしている。

30

【0035】

ディー電極 12 とそれに対向するダミーディー電極 13 との間に形成される加速間隙 11 は、等周回位相線に沿って設置する。

【0036】

図 3 において、低エネルギー領域ではサイクロトロンと同様にイオンの入射点 52 付近を中心とする軌道をとる。

【0037】

より加速されると、高エネルギーの軌道は取出しに用いるセプタム電磁石 43 の付近で密に集まっており、逆に内導体 14 が設置されている付近では各軌道が互いに離れた位置関係にある。この軌道が密に集まっている点を集約領域、離散した領域を離散領域と呼ぶこととする。このような軌道配置とし、集約領域付近からビームを取り出すことで、ビームを取り出す際に必要なビームキック量を少なくできるため、エネルギー可変のビーム取出しを容易に行うことができる。

40

【0038】

上記のような軌道構成と軌道周辺での安定な振動を生じさせるために、本実施例の円形加速器 39 においては設計軌道の半径方向外周側に行くにつれて磁場の値が小さくなる主磁場分布を用いている。また、設計軌道に沿って磁場は一定である。よって、設計軌道は円形となり、ビームエネルギーが高まるにつれその軌道半径・周回時間は増大する。

【0039】

50

本実施例の円形加速器 39 の設計軌道について式 (1) に基づき以下説明する。

【0040】

【数 1】

$$n = - \frac{\rho}{|B|} \frac{\partial B}{\partial r} \quad \cdots (1)$$

【0041】

ここで、 ρ は設計軌道の偏向半径、 B は磁場強度、 B / r は半径方向の磁場勾配を表す。

10

【0042】

式 (1) にて定義される規格化された磁場勾配 n が 0 より大かつ 1 未満となるようにすることで、設計軌道から半径方向に微小にずれた粒子は設計軌道に戻すような復元力を受けると同時に軌道面に対して鉛直な方向にずれた粒子も軌道面に戻す方向に主磁場 2 から復元力を受ける。

【0043】

すなわち、ビームのエネルギーに対して適切に磁場を小さくしていけば、常に設計軌道からずれた粒子は設計軌道に戻そうとする向きに復元力が働き、設計軌道の近傍を振動する。これにより、安定にビームを周回・加速させることが可能である。また、全エネルギーのビームで、軌道面内に平行な方向のベータatron振動数 (水平チューン) は 1 より小

20

【0044】

上述の主磁場分布は、前述の通り、主コイル 42 およびトリムコイルに所定の励磁電流を流すことにより励起される。主磁極 38 の形状は軌道面に対して対称な形状であり、軌道面上においては軌道面に垂直な方向の磁場成分のみを持つ。

【0045】

本実施例の円形加速器 39 は、主磁場 2 が弱収束磁場である。このため、等時性磁場の A V F (A z i m u t h a l l y V a r i n g F i e l d) サイクロトロンにおける H i l l 磁場および V a l l e y 磁場に由来する制約を受けることなく主磁場 2 を高めることができるので、ビーム軌道の偏向半径を小さくすることが可能である。

30

【0046】

なお、A V F サイクロトロンとは、磁場の強さを半径が大きくなるほど強くすることにより、粒子の周回軌道長を短くし、回転周期を短縮する方法により加速粒子の回転周波数と加速周波数を同期させる方式のサイクロトロンである。

【0047】

次にビームの取出し方法につき説明する。本実施例の円形加速器 39 では、ビームの取出しには、高周波キッカ 70、ピーラ磁場領域 44、リジェネレータ磁場領域 45、セプタム電磁石 43、上流側コイル 34、下流側コイル 35 および高エネルギービーム輸送系 47 を用いる。

【0048】

高周波キッカ 70 の断面構成を図 4 に示す。また、図 4 中 B の方向より高周波キッカ 70 を見た鳥瞰図を図 5 に示す。

40

【0049】

高周波キッカ 70 は、ビームを取出すための取出し高周波を印加する装置であり、接地電極 71 と高圧電極 72 等を備えている。取出し高周波は、加速高周波とは周波数が異なる。

【0050】

図 4 に示すように、接地電極 71 と高圧電極 72 とは、最大出射エネルギー軌道 80 や最小出射エネルギー軌道 81 を挟むように対向して設置されており、かつ軌道面内で軌道と直交する方向に高周波電場が作用するように形状が定められている。

50

【 0 0 5 1 】

また、図 4 および図 5 に示すように、接地電極 7 1 には金属製の突起部 7 3 が取り付けられており、接地電極 7 1 と高圧電極 7 2 との間に生じる高周波電場の集中を高めるように構成されている。

【 0 0 5 2 】

高周波電圧が印加される高圧電極 7 2 は接地電極 7 1 に対して絶縁支持する。絶縁支持の方法は特に限定されず、絶縁支持体（図示省略）等によって支持する方法が考えられる。また、接地電極 7 1 と高圧電極 7 2 は、高周波通電による発熱に対する冷却機構（図示省略）を有する。

【 0 0 5 3 】

接地電極 7 1、高圧電極 7 2 は、共にビームが通過する軌道面付近に通過口 7 1 A、7 2 A をそれぞれ有している。これら通過口 7 1 A、7 2 A は、ビームの軌道面に対し垂直な方向のベータatron振動による拡がり considering ビーム衝突が起きない程度の広さとする。

【 0 0 5 4 】

なお、本実施例の高周波キッカ 7 0 は、図 4 に示すようにビームの入口側や出口側の端面が開いた形状であるが、ビーム通過口 7 1 A を除いて端面を接地電極 7 1 で閉塞し、空洞共振器構造とすることもできる。

【 0 0 5 5 】

高周波キッカ 7 0 は、最小出射エネルギー軌道 8 1 と最大出射エネルギー軌道 8 0 との双方に電場が作用するよう配置すればよい。ただし、好適には図 2 に示すようにビーム出射経路入口 8 2 の近辺に配置することが望ましい。

【 0 0 5 6 】

図 2 に戻り、ピーラ磁場領域 4 4 やリジェネレータ磁場領域 4 5 は、ビームに作用する多重極磁場（擾乱磁場）が存在する領域である。この多重極磁場は 2 極以上の極数の磁場成分を含み、少なくとも 4 極磁場成分を含む高次磁場よりなる。なお、4 極以上の多極磁場、あるいは 2 極磁場が含まれていてもよい。

【 0 0 5 7 】

ピーラ磁場領域 4 4 は、径方向外周側に向かって主磁場 2 を弱める方向の磁場勾配となっている。これに対し、リジェネレータ磁場領域 4 5 は、逆に径方向外周側に向かって主磁場 2 を強める方向の磁場勾配となっている。なお、ピーラ磁場領域 4 4 としては、磁極端部の主磁場 2 が減少する領域を利用することもできる。

【 0 0 5 8 】

ピーラ磁場領域 4 4 と、リジェネレータ磁場領域 4 5 は、最大出射エネルギー軌道 8 0 の外周側に、ビーム出射経路入口 8 2 を挟んである方位角領域にそれぞれ配置する。ただし、ビーム進行方向に対して上流側にピーラ磁場領域 4 4 を、下流側にリジェネレータ磁場領域 4 5 を配置する。

【 0 0 5 9 】

ピーラ磁場領域 4 4 およびリジェネレータ磁場領域 4 5 には、磁性体製の複数の磁極片がコイル、あるいはその両者を非磁性材にて主磁極 3 8 に対して固定配置することで形成する。

【 0 0 6 0 】

磁極片とコイルを併用する場合は、磁極片を配置するピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とは異なる空間にコイルを配置してもよい。図 2 は、そのような配置の例を示している。つまり、磁極片をそれぞれピーラ磁場領域 4 4 やリジェネレータ磁場領域 4 5 の中やその周囲に配置する。例えば、上流側コイル 3 4 と下流側コイル 3 5 を図 2 に示すように配置する。

【 0 0 6 1 】

いずれの場所に配置するにしても、上流側コイル 3 4 は主磁場 2 を弱める向きの磁場を発生させ、下流側コイル 3 5 は主磁場 2 を強める向きの磁場を発生させることに変わりは

10

20

30

40

50

ない。

【0062】

図2のA-A'矢視図である図6に、上流側コイルや下流側コイルを用いない場合のリジェネレータ磁場領域45の磁極片配置例を示す。また、図7に図6の直線r上における磁場分布図を示す。

【0063】

図6に示すように、磁極片としては、リジェネレータ磁場領域45に磁場勾配を発生させる磁場勾配用シム36と、磁場勾配用シム36が最大出射エネルギー軌道80の内周側に発生させる不要な漏洩磁場を打ち消すための磁場補正用シム37を用いる。図6中r軸上の主磁場2は、図7に示すような分布となり、最大出射エネルギー軌道までビームは安定に周回する。

10

【0064】

また、図8に上流側コイルや下流側コイルを用いる場合を示す。この図8に示すように、リジェネレータ磁場領域45内に下流側コイル35を配置する場合は、磁極片である磁場勾配用シム36の周囲に下流側コイル35を巻回する。なお、ピーラ磁場領域44については、磁場勾配用シム(図示省略)の周囲に上流側コイル34を巻回する。

【0065】

セプタム電磁石43は、図9に示すように、磁性体の内周側シム3と、磁性体の外周側シム4と、両極性通電するセプタムコイルと、両極性電源10を備えている。セプタムコイルは、内周側セプタムコイル導体5と外周側セプタムコイル導体6およびコイル導体接

20

【0066】

続部7およびコイル口出し部8で構成される。セプタム電磁石43は、ビーム出射経路入口82の下流側に配置される。図9は巻き数1ターンでセプタムコイルを構成した場合を示している。つまり、内周側セプタムコイル導体5と外周側セプタムコイル導体6とが、コイル導体接続部7によって電氣的に接続され、コイル口出し部8でコイル励磁のための両極性電源10と電氣的に接続されている。

【0067】

なお、コイル導体接続部7とコイル口出し部8とは逆に設けられていてもよく、ビーム出射経路入口82に近い側にコイル口出し部8を設けてコイル導体接続部7をその反対側に設けてもよい。更には、図8に示すようにコイル口出し部8は内周側セプタムコイル導体5や外周側セプタムコイル導体6の端部に設ける必要はなく、内周側セプタムコイル導体5や外周側セプタムコイル導体6の一部を削ってビーム取出し方向の中間部分に設けてもよい。

30

【0068】

両極性電源10によってセプタムコイルに励磁電流を流すことで、セプタム電磁石43内部に2極磁場を形成することができる。内周側セプタムコイル導体5、外周側セプタムコイル導体6、コイル導体接続部7およびコイル口出し部8は、それぞれ発熱に対する冷却手段を有すると共に、励磁電流による電磁応力による変形が許容範囲内となるようサポート(図示省略)によって支持する。

【0069】

40

内周側シム3および外周側シム4は、磁性体性であって、例えば積層鋼板からなる。

【0070】

内周側シム3は、図9に示すように、ビームがビーム出射経路入口82に到達する直前であるラスト1ターンの軌道1と干渉しないように楔形をしている。外周側シム4は、ビームの通過領域を挟んで内周側シム3と対向するように設置されていればよく、その形状は特に限定されない。

【0071】

ここで、取出しエネルギー帯のうち、最大出射エネルギーのB積を B_{max} 、最小出射エネルギーのB積を B_{min} とし、 $(B_{max} + B_{min}) / 2$ と等しいB積に相当するビームエネルギーを中間エネルギーと定義する。そして、内周側シム3お

50

よび外周側シム 4 のみで、中間エネルギーのビームが取出される磁場となるよう、それぞれのシムの厚みや形状を設定する。

【0072】

このように設計したセプタム電磁石 43 において、中間エネルギーと異なるエネルギーのビームを取出す場合は、セプタムコイルに適切な励磁電流を通電する。図 10 にセプタムコイルの励磁電流と取出しビームエネルギーの関係を示す。

【0073】

図 10 に示すように、中間エネルギーよりも低いエネルギーのビームを取出す場合は、高いエネルギーのビームを取出す場合と逆極性の励磁電流をセプタムコイルに流すことで対応する。

【0074】

本実施例の円形加速器 39 はパルス出射であるから、セプタムコイルの励磁電源である両極性電源 10 は、直流励磁ではなくパルス励磁として電源の消費電力を低減することもできる。この場合はセプタムコイルの巻き数は、インダクタンスを抑制するために、10 ターン以下であることが望ましい。

【0075】

なお、両極性電源 10 の代わりに単極性の電源を用いることができる。この場合、図 10 に示すように、内周側シム 3 や外周側シム 4 の厚さは、内周側シム 3 および外周側シム 4 のみで最大エネルギーのビームが取出される磁場となるよう、それぞれのシムの厚みや形状を設定することが望ましい。その上で、最大エネルギー以外のビームは、セプタムコイルに対して通電することで取り出すことが望ましい。

【0076】

図 9 の A - A' 矢視断面（図 2 の A - A' 矢視断面と同じ）を図 6、図 8、図 11、図 12 に示す。

【0077】

図 6 や図 8 に示すように、内周側シム 3 と外周側シム 4 とは、互いに接続することなく独立して置くことができる。

【0078】

また、図 11 に示すように、内周側シム 3 と外周側シム 4 とを、ビームの軌道面に対して鉛直方向上方側に配置された上側シム 100 により上面側で接続するとともに、ビームの軌道面に対して鉛直方向下方側に配置された下側シム 101 により下面側で接続した構造のセプタム電磁石 43 A を用いることができる。

【0079】

さらに、図 12 に示すように、ビーム軌道との干渉を避けるために、内周側シム 3 を省略した構造のセプタム電磁石 43 B を用いることもできる。なお、図 12 では上側シム 100 や下側シム 101 を配置する場合について示しているが、図 6 等のように上側シム 100 や下側シム 101 を適宜省略することも可能である。

【0080】

また、軌道面付近で内周側シム 3 を分割し、ビーム軌道と干渉することをより確実に抑制する構造とすることができる。内周側シム 3 を分割構造とする場合においても、磁性体からなるシムを上側シム 100 や下側シム 101 と同様の位置に適宜配置することができる。

【0081】

次に、図 13 を用いてビームの取出し手順について説明する。

【0082】

1 加速周期は、加速高周波の立ち上げ、すなわち高周波加速空洞の共振周波数 f_{cav} がある所定値になったタイミングで加速電圧 V_{acc} の印加を開始する時点より始まる。

【0083】

V_{acc} が立ち上がった後に、ビームがイオン源 53 から主磁極 38 内部の真空空間に入射され、時間 t_1 経過後にビームの高周波捕獲が終了する。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 4 】

捕獲されたビームが加速されて所望の取出しエネルギーに達したら、加速高周波の遮断の制御信号を出す。

【 0 0 8 5 】

それから時間 t_2 が経過すると加速高周波が OFF 状態となる。それと同時に、高周波キッカ70に対して高周波電圧 V_{ext} の印加を開始する。高周波キッカ70が共振器構造でなく、静電容量が適切な値となるように設計されていれば、高周波キッカ70の高周波電圧は数 μs 以下の応答で素早く立ち上がる。

【 0 0 8 6 】

取出し用の高周波電圧 V_{ext} の周波数 f_{ext} は、周回しているビームの水平方向チューン r の小数部 r と、周回周波数 f_{rev} との積 $r \times f_{rev}$ と等しくなるようにしておく。その結果として、水平方向ベータatron振動の振幅は持続的に増大し続ける。

【 0 0 8 7 】

なお、接地電極71と高圧電極72とは、軌道面内で軌道と直交する方向（水平方向）に高周波電場が作用するように形状が定められているため、この高周波電場によりビームがキックされることで、水平方向のベータatron振動の振幅を効率的に増大させることができる。ただし、高周波キッカ70のみでは、ビームを取り出すのに十分なターンセパレーションを得ることはできない。そこで、ピーラ磁場領域44とリジェネレータ磁場領域45が必要となる。

【 0 0 8 8 】

ビームは、高周波キッカ70の作用で、やがてピーラ磁場領域44とリジェネレータ磁場領域45に到達する。ビームは、ピーラ磁場領域44を通過すると外周側にキックされ、またリジェネレータ磁場領域45を通過すると逆に内周側にキックされる。このとき、水平チューン1であり、ピーラ磁場領域44およびリジェネレータ磁場領域45は共に径方向に適切な磁場勾配を有するので、複数回ビームが周回するうちに、キック量が次第に増えていき、ターンセパレーションが増大する。つまり、 $2r = 2$ のベータatron振動の共鳴条件を利用することで、ターンセパレーションを指数関数的に増大させることができる。

【 0 0 8 9 】

ビーム出射経路入口82にはセプタム電磁石43を設置しているため、やがて内周側シム3と内周側セプタムコイル導体5を合計した厚みを大きく超えるターンセパレーションが得られるようになると、ビームはセプタム電磁石43内部へと導かれる。

【 0 0 9 0 】

このとき、セプタムコイルの励磁電流がビームエネルギーに応じた適切な値であれば、ビームは十分な偏向を受けて、後段の高エネルギービーム輸送系47へ導かれ、ビーム出射が開始される。図13には、セプタムコイルをパルス励磁した場合の例を記載している。

【 0 0 9 1 】

ビームの取出しが始まる前にセプタム電磁石43の励磁電流の通電を開始する。取出し高周波の印加を終えた後は、ビームの取出しを行わないため、セプタムコイルの励磁電流を遮断することが望ましいが、次のビーム取出しまでの時間間隔が短い場合は、セプタムコイルの励磁を継続してもよい。

【 0 0 9 2 】

なお、図13に示したように、高周波キッカ70へ高周波電圧印加を開始した直後は、可能な限り大きな高周波電圧 (V_{ext}) を印加しておき、ビームがピーラ磁場領域44とリジェネレータ磁場領域45に到達する直前に V_{ext} の振幅を低下させることができる。これにより、ビーム出射開始までの時間を短縮でき、線量率を向上できる。

【 0 0 9 3 】

ビームがピーラ磁場領域44とリジェネレータ磁場領域45に到達したとき以降に V_e

10

20

30

40

50

V_{ex} の振幅を制御することで、ビーム出射電流を調整することができる。つまり、 V_{ex} の振幅が大きくなるほど、ビーム出射電流も大きくなる。また、 V_{ex} の印加を任意のタイミングで停止することでビーム出射を停めることができる。従って、スキャニング照射で要求されるスポット線量を 1 回の出射パルスビームで過不足なく照射することができ、線量率が向上する。

【0094】

また、 V_{ex} の振幅を制御するかわりに、 V_{ex} の周波数をスweepするか位相を変えることの何れか一つ以上の制御によっても、ビーム出射電流を調整することができる。

【0095】

また、出射後に加速器内に周回電荷が残存していれば、 V_{ex} を再び印加することでビーム出射を再開できるため、次のスポット照射に用いることができる。このため、イオン源 53 より入射された電荷を無駄なく使用でき、線量率がさらに向上する。なお、加速器内に残存する周回電荷量があるレベル以下となると 1 加速周期が終了する。このような加速周期を繰り返すことで、ビームを取り出す。

【0096】

以上の取出し方法を実現する高周波電源と制御系のブロック図を図 14 に示す。図 14 は加速高周波電源 25、高周波キッカ電源 86 とのいずれも三極管 24A、24B を用いた場合の構成であるが、そのほかに四極管や半導体増幅器を用いることができる。

【0097】

ビームの加速系統として、入力カプラ 20 と、ピックアップループ 21 と、カソード抵抗 22、プレート DC 電源 23、および三極管 24A を有する加速高周波電源 25 と、回転コンデンサ 30 と、角度検出機構 90 と、ディー電極 12 と、外導体 15 とを用いる。

【0098】

加速高周波電源 25 は自励発振式とし、ピックアップループ 21 にて加速高周波の一部をカソード回路に帰還させる方式とする。高周波加速電圧は、プレート DC 電源 23 の出力電圧を高速に変調することで制御する。カソードバイアス電位は、図 14 に示したようにカソード抵抗 22 でプレート電位を分圧する形で与えるか、あるいはカソード電源を用いて与える構成としている。なお、加速高周波電源 25 を他励発振式とし、ピックアップループ 21 を省略して、プレプログラミング式の前発振器出力を前段増幅したものを三極管 24A の入力としてもよい。

【0099】

ビームの取出し系統には、両極性電源 10 と、セプタム電磁石 43 と、上流側コイル 34 と、下流側コイル 35 と、上流側コイル電源 87 と、下流側コイル電源 88 と、三極管 24B と、プレート DC 電源 26 と、グリッドバイアス電源 89 と、原発振器 92 と、スイッチ 93、と前段増幅器 94 と、高周波キッカ電源 86 と、高周波キッカ 70 とを用いる。

【0100】

原発振器 92 は、高周波キッカ 70 用に、ある周波数帯域の信号を生成する。その信号には、ビームのチューンスプレッド分と、高周波キッカ 70 への高周波電圧 V_{ex} 印加中に水平方向チューンが変動することを考慮し、必要な周波数帯成分が含まれるものとする。この信号はスイッチ 93 を経て前段増幅器 94 にて増幅される。増幅後は、三極管 24B で更に増幅され、高周波キッカ 70 に供給される。高周波キッカ 70 の高周波電圧 V_{ex} の振幅は、前段増幅器 94 の利得を変えるか、あるいはプレート DC 電源 26 の出力電圧を高速に変調することで制御する。

【0101】

加速系統における加速高周波 f_{cav} の印加タイミングや、ビーム取出し系統における取出し高周波 f_{ex} の印加タイミングなどを制御するのが演算装置 91 である。

【0102】

演算装置 91 は、回転コンデンサ 30 の角度検出機構 90 か、あるいは加速高周波のビ

10

20

30

40

50

ックアップ信号から検出する加速高周波 f_{cav} の周波数変調パターンや、制御装置 191 (図 15 参照) からの各スポット照射許可や各スポットへの要求線量の情報の入力を受けて、加速高周波電源 25 に対して加速高周波 f_{cav} の ON/OFF タイミングと電圧振幅の指令信号を出力する。

【0103】

また、演算装置 91 は、上記情報の入力に基づいて、セプタム電磁石 43 の ON/OFF タイミングと励磁電流の指令信号を両極性電源 10 に対して出力する。

【0104】

更に、演算装置 91 は、高周波キッカ 70 の ON/OFF タイミングと電圧 V_{ext} の振幅の指令信号を高周波キッカ電源 86 に対して出力する。

10

【0105】

また、演算装置 91 は、下流側コイル電源 88 へ、すなわち下流側コイル 35 に対して on/off タイミングや励磁電流の指令信号を、上流側コイル電源 87 へ、すなわち上流側コイル 34 に対して on/off タイミングや励磁電流の指令信号を出力する。

【0106】

また、すべての出射エネルギー帯のビームに対し、加速器内部に残存する周回電荷量を静電的あるいは磁氣的に計測するビームモニタ 95 をビーム軌道上の何れか任意の箇所に設置する。そして、周回電荷量があるレベル以下に減少したら、演算装置 91 は再度、加速電圧の印加を開始し、捕獲・加速・取出しのプロセスを繰り返す。

【0107】

20

次に、上述した本実施例の円形加速器 39 を粒子線治療などに用いる粒子線治療システムに適用した場合の全体構成について図 15 を用いて説明する。図 15 は本実施例の粒子線治療システムの全体構成を示す図である。

【0108】

図 15 において、粒子線治療システム 300 は、円形加速器 39、高エネルギービーム輸送系 47、回転ガントリ 190、照射装置 192、治療台 201、および制御装置 191 を備えている。

【0109】

円形加速器 39 から出射された特定エネルギーのイオンビームは、高エネルギービーム輸送系 47 および回転ガントリ 190 により照射装置 192 まで輸送される。輸送された特定エネルギーのイオンビームは照射装置 192 で患部形状に合致するように整形され、治療台 201 に横になった患者 200 の患部標的に対して所定量照射される。

30

【0110】

これら円形加速器 39、高エネルギービーム輸送系 47、回転ガントリ 190、照射装置 192、治療台 201 の動作は制御装置 191 によって実行される。

【0111】

制御装置 191 はコンピュータ等で構成されている。これらを構成するコンピュータは、CPU やメモリ、インターフェース等を備えており、各機器の動作の制御や後述する各種演算処理等が様々なプログラムに基づいて実行される。これらのプログラムは各構成内の内部記録媒体や外部記録媒体、データサーバに格納されており、CPU によって読み出され、実行される。

40

【0112】

なお、動作の制御処理は、1つのプログラムにまとめられていても、それぞれが複数のプログラムに別れていてもよく、それらの組み合わせでもよい。また、プログラムの一部または全ては専用ハードウェアで実現してもよく、モジュール化されていても良い。更には、各種プログラムは、プログラム配布サーバや内部記憶媒体や外部記録媒体から各装置にインストールされてもよい。

【0113】

このとき、本発明の円形加速器 39 は、上述の通り、小型化が可能であり、かつビームロスが低減されるため、線量率が向上して照射時間が短くなり、患者スループットを増加

50

させることができる。

【0114】

なお、円形加速器39から照射装置192に直接ビームを取出すことができる。また、照射装置192を複数設けることができる。更に、照射装置192は回転することなく固定されていてもよい。また、照射装置192で用いられる照射方法についても特に限定されず、ビームを走査するスキャン方式や散乱体を用いるワブラ方式のいずれでも良い。

【0115】

次に、本実施例の効果について説明する。

【0116】

上述した本実施例の粒子線治療システム300は、主磁場2、および周波数変調した高周波電場によりビームを加速する円形加速器39と、円形加速器39から取出された特定エネルギーのビームを照射する照射装置192と、を備えている。このうち円形加速器39は、周波数変調が可能であり、ビームを加速する加速高周波を印加する加速高周波印加装置と、加速高周波とは周波数が異なり、ビームを取出すための取出し高周波を印加する高周波キッカ70と、2極以上の極数の磁場成分を含み、少なくとも4極磁場成分を含む高次磁場よりなる擾乱磁場領域を形成するビーラ磁場領域44、リジェネレータ磁場領域45と、磁性体のシム、および内周側セプタムコイル導体5、外周側セプタムコイル導体6を有するセプタム電磁石43、あるいは43A、あるいは43Bと、を備えている。

【0117】

以上のような構成とすることで、主磁場2を高めて小型化を図る円形の加速器において、小型で、かつ可変エネルギーのビーム取出しを可能とすることができる。また、散乱体を用いることなくエネルギー可変ビームを取出せるので、取出し時に失われるビーム電流値を最小限に留めることができ、高い照射線量率を実現することができる。更に、電気的に取出しエネルギーを変更できるため、散乱体を機械的に移動する方式よりもエネルギー切替えに要する時間が短い、という利点も有する。

【0118】

このような円形加速器39は、粒子線治療システムの患者スルーットを向上させることに大きく寄与する。

【0119】

また、セプタム電磁石43、43A、43Bは、セプタムコイルに両極性通電する両極性電源10を更に有しているため、両極性通電しない場合と比較して、励磁電流振幅をおおよそ半分にすることができ、セプタムコイルの熱負荷を1/4程度までに低減することができる。従って、セプタム電磁石43の構造を簡易化することができるため、小型化および低コスト化を図ることができる。

【0120】

更に、シムは、外周側セプタムコイル導体6よりビーム周回軌道外周側に配置された外周側シム4により構成されることで、セプタムコイルが発生すべき磁場を低減することができ、セプタムコイルの熱負荷および電磁応力を抑制することができる。

【0121】

また、シムは、内周側セプタムコイル導体5よりビーム周回軌道内周側に配置された内周側シム3、および外周側セプタムコイル導体6よりビーム周回軌道外周側に配置された外周側シム4により構成されることによっても、セプタムコイルが発生すべき磁場を低減することができ、セプタムコイルの熱負荷および電磁応力を抑制することができる。

【0122】

更に、内周側シム3は、ビームの周回軌道に干渉しない楔形の形状であることで、円形加速器39内でのビーム損失を抑制し、より高い照射線量率を実現することができる。

【0123】

また、内周側シム3および外周側シム4は、互いに接続されることなく独立して配置されていることにより、簡易な構造でセプタム電磁石43を構成することができ、更なる小

10

20

30

40

50

型化や低コスト化を図ることができる。

【0124】

更に、ビームの軌道面に対して鉛直方向上方側に配置された上側シム100、およびビームの軌道面に対して鉛直方向下方側に配置された下側シム101を更に有し、内周側シム3と外周側シム4のうち少なくともいずれか一方は上側シム100および下側シム101と接続されていることで、セプタム電磁石43A、43Bによって生成する高エネルギービーム輸送系47にビームを導くための磁場が主電磁石40によって形成される主磁場2の端部漏れ磁場をより効率的に遮蔽することができ、セプタムコイルの励磁電流を低減することができる。

【0125】

また、シムは、積層鋼板コアであり、内周側セプタムコイル導体5、外周側セプタムコイル導体6よりなるコイル巻き線を10ターン以下で構成することにより、パルス励磁が可能となり、励磁電源の消費電力を抑制できる。

【0126】

更に、ビームの入射点52が、円形加速器39の中心より出射側にずれるように主磁場2の分布を形成することで、ビーム出射経路入口82に近い側にビーム周回軌道が密になる集約領域を形成することができる。このため、可変エネルギーのビーム出射をする際に要求される高周波キッカ70のビームキック量は、ビームの入射点52を円形加速器39の中心に置き、この中心に対し同心円軌道となるよう主磁場分布を形成した場合に比べて小さくなるため、高周波キッカに要求される高周波電力を低く抑えることができる。

【0127】

また、ピーラ磁場領域44、リジェネレータ磁場領域45をそれぞれ1箇所ずつ配置し、ピーラ磁場領域44は、主磁場2が径方向外周側に向けて弱まる磁場勾配を有する第1擾乱磁場領域とし、リジェネレータ磁場領域45は、主磁場2が径方向外周側に向けて強まる磁場勾配を有する第2擾乱磁場領域とすることにより、高周波キッカ70によるキックでこれらの擾乱磁場領域にまで到達したビームは、さらに大きくキックされてセプタム電磁石43の入口に入り、やがて加速器外へと取出される。

【0128】

更に、ピーラ磁場領域44、リジェネレータ磁場領域45を、磁性体よりなる磁場勾配用シム36と磁場補正用シム37のみにより形成し、上流側コイル34と下流側コイル35を省略すれば、熱負荷や電源コストを抑制することができる、との効果が得られる。また、特に磁場補正用シム37によって、ピーラ磁場領域44、リジェネレータ磁場領域45からの漏洩磁場が抑制されるため、ビームは、取出しエネルギーに達する前に軌道が乱されにくくなり、ビームをより安定に加速することができる。

【0129】

また、ピーラ磁場領域44、リジェネレータ磁場領域45の形成に、磁性体に加えて、上流側コイル34と下流側コイル35も用うるとすれば、ビームの効率的な取出しに向けた第1および第2擾乱磁場領域の磁場強度調整が可能となる。

【0130】

また、高周波キッカ70には、取出し高周波として、取出したいエネルギーのビームの軌道面内、かつビームの軌道と直交する方向のベータatron振動振幅を増大させる高周波を印加する。取出し高周波の電圧振幅、位相、周波数、印加時間のうち少なくともいずれか一つ以上を制御して、ビーム出射電流を制御することができる。

【0131】

更に、加速高周波印加装置による加速高周波の印加タイミング、高周波キッカ70による取出し高周波の印加タイミングを制御する演算装置91を更に備え、演算装置91は、ビームを所望のエネルギーまで加速したのちに加速高周波の遮断を開始し、その後取出し高周波の印加を開始し、ビームの取出しが始まる前にセプタム電磁石43、43A、43Bのセプタムコイルに励磁電流を通電し、取出し高周波の印加を終えた後にセプタムコイルの励磁電流を遮断する。

10

20

30

40

50

【 0 1 3 2 】

例えば、高周波キッカ 7 0 への取出し高周波印加を任意のタイミングで停止することで、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とにビームが到達しなくなり、ビームの円形加速器 3 9 から出射の中断ができるようになる。

【 0 1 3 3 】

また、高周波キッカ 7 0 に印加を再開することで、周回電荷が残存していれば再びビームを入射・捕獲・加速することなしにビームの出射の再開もできる。

【 0 1 3 4 】

また、高周波キッカ 7 0 に印加する取出し高周波の電圧振幅を適切に制御することで、ビームの安定性に影響する要因を吸収し、ビーム電流の時間変動が少ない安定したビームを出射することができる。

10

【 0 1 3 5 】

すなわち、取出し高周波により、1 加速周期ごとの出射ビーム電荷を高精度に制御できるため、スキャンングに適した線量制御が可能となる。また、周回電荷を余すことなく取り出せ、かつエネルギー変更に散乱体も必要ないことから線量率が増加し、照射時間を短くでき、粒子線治療システムの患者スループットを向上させることができる。

【 0 1 3 6 】

また、演算装置 9 1 は、更に、取出し高周波の印加開始後、かつビームが擾乱磁場領域に到達する前に、取出し高周波の電場を弱めることにより、ビーム出射までの時間を短縮できる。

20

【 符号の説明 】

【 0 1 3 7 】

1 ... ラスト 1 ターンの軌道

2 ... 主磁場

3 ... 内周側シム

4 ... 外周側シム

5 ... 内周側セプトラムコイル導体

6 ... 外周側セプトラムコイル導体

7 ... コイル導体接続部

8 ... コイル口出し部

1 0 ... 両極性電源

1 1 ... 加速間隙

1 2 ... ディー電極

1 3 ... ダミーディー電極

1 4 ... 内導体

1 5 ... 外導体

2 0 ... 入力カプラ

2 1 ... ピックアップループ

2 2 ... カソード抵抗

2 3 ... プレート D C 電源

2 4 A、2 4 B ... 三極管

2 5 ... 加速高周波電源

2 6 ... プレート D C 電源

3 0 ... 回転コンデンサ

3 1 ... モータ

3 2 ... 固定電極

3 3 ... 回転電極

3 4 ... 上流側コイル（擾乱磁場領域形成部、擾乱磁場形成用コイル）

3 5 ... 下流側コイル（擾乱磁場領域形成部、擾乱磁場形成用コイル）

3 6 ... 磁場勾配用シム（擾乱磁場領域形成部、磁極片）

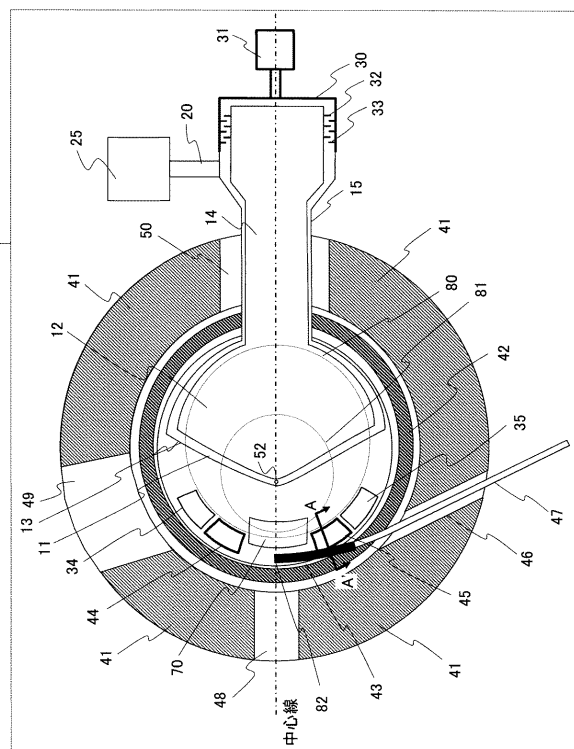
30

40

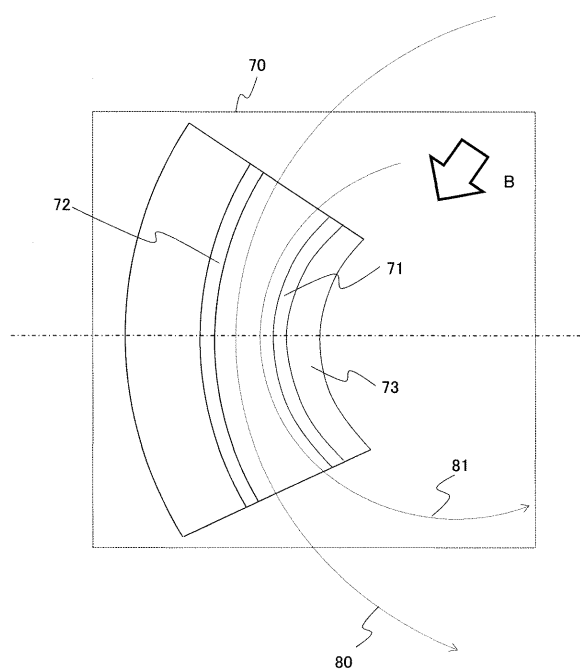
50

3 7 ... 磁場補正用シム（擾乱磁場領域形成部、磁極片）	
3 8 ... 主磁極	
3 9 ... 円形加速器	
4 0 ... 主電磁石	
4 1 ... リターンヨーク	
4 2 ... 主コイル	
4 3、4 3 A、4 3 B ... セプタム電磁石	
4 4 ... ピーラ磁場領域（第 1 擾乱磁場領域）	
4 5 ... リジェネレータ磁場領域（第 2 擾乱磁場領域）	
4 7 ... 高エネルギービーム輸送系	10
7 0 ... 高周波キッカ（取出し高周波印加装置）	
7 1 ... 接地電極	
7 1 A、7 2 A ... ビーム通過口	
7 2 ... 高圧電極	
7 3 ... 突起部	
8 0 ... 最大出射エネルギー軌道	
8 1 ... 最小出射エネルギー軌道	
8 2 ... ビーム出射経路入口	
8 6 ... 高周波キッカ電源	
8 7 ... 上流側コイル電源	20
8 8 ... 下流側コイル電源	
8 9 ... グリッドバイアス電源	
9 0 ... 角度検出機構	
9 1 ... 演算装置	
9 2 ... 原発振器	
9 3 ... スイッチ	
9 4 ... 前段増幅器	
9 5 ... ビームモニタ	
1 0 0 ... 上側シム	
1 0 1 ... 下側シム	30
1 9 0 ... 回転ガントリ	
1 9 1 ... 制御装置	
1 9 2 ... 照射装置	
2 0 0 ... 患者	
2 0 1 ... 治療台	
3 0 0 ... 粒子線治療システム	

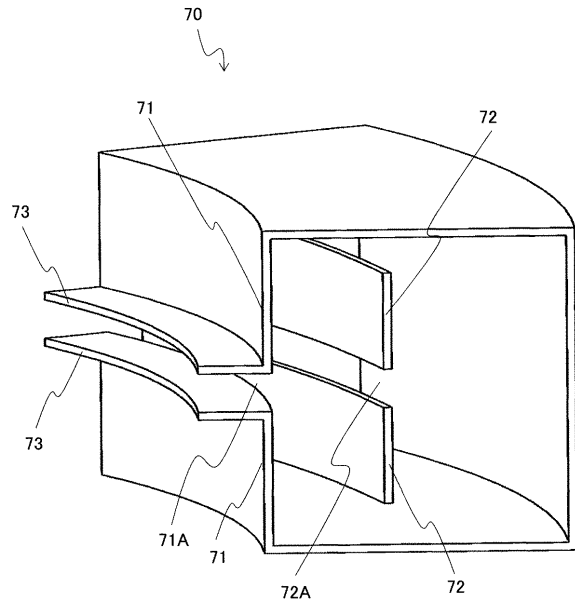
【 図 2 】



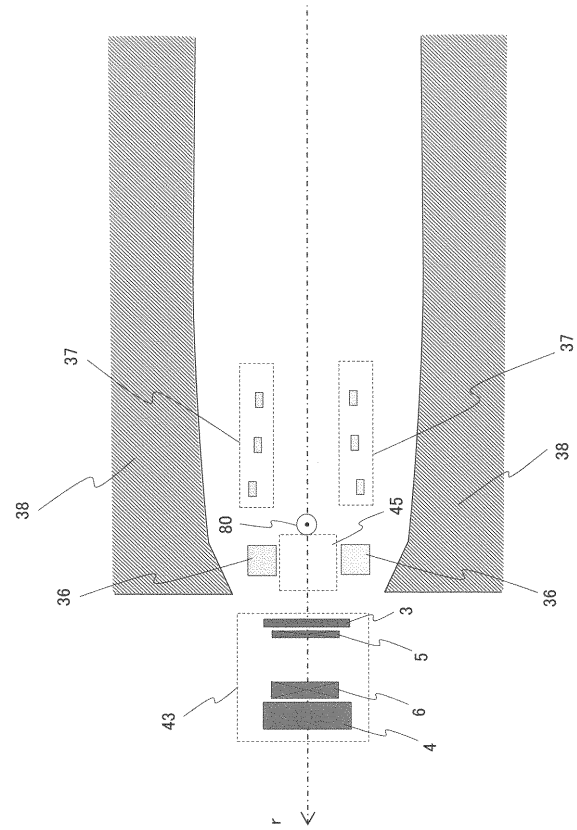
【 図 4 】



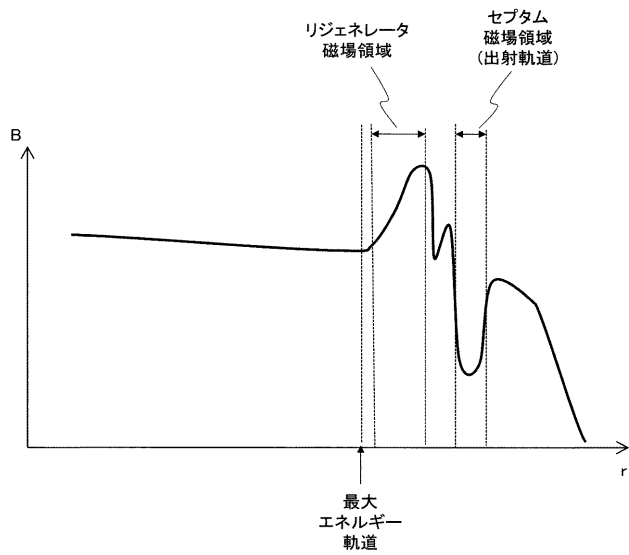
【図 5】



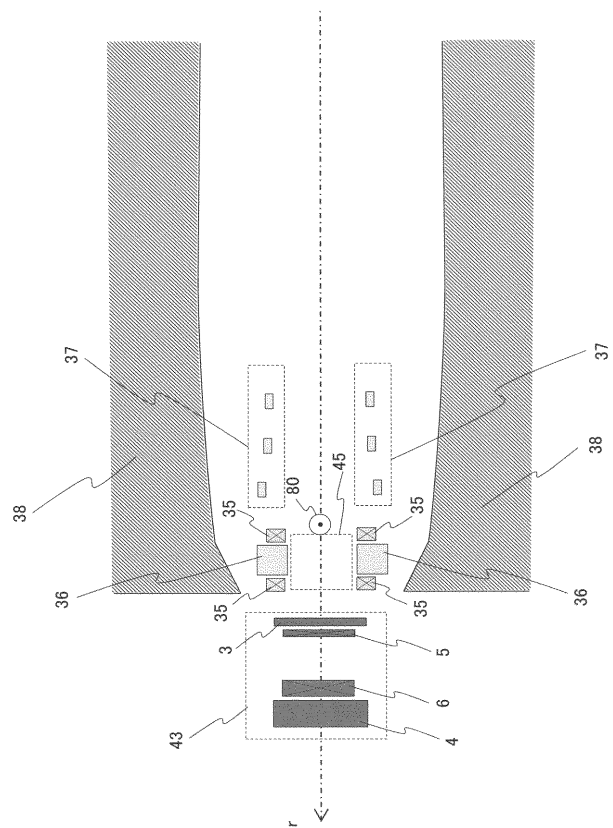
【図 6】



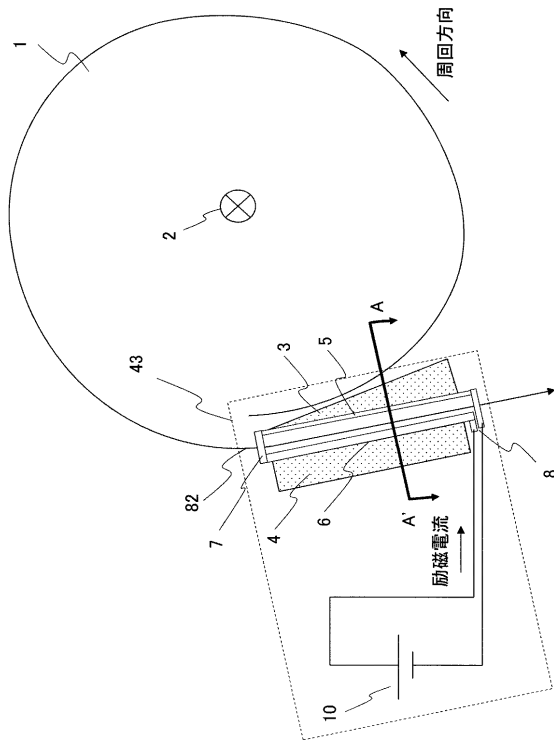
【図 7】



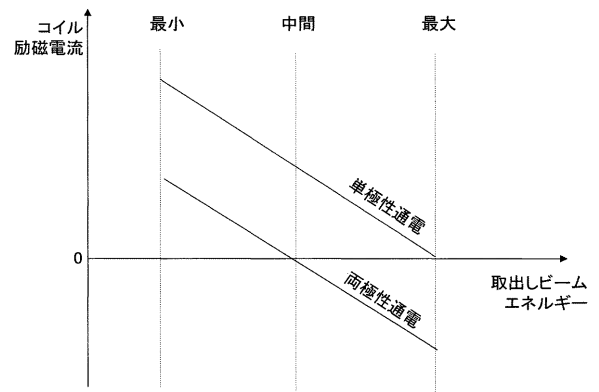
【図 8】



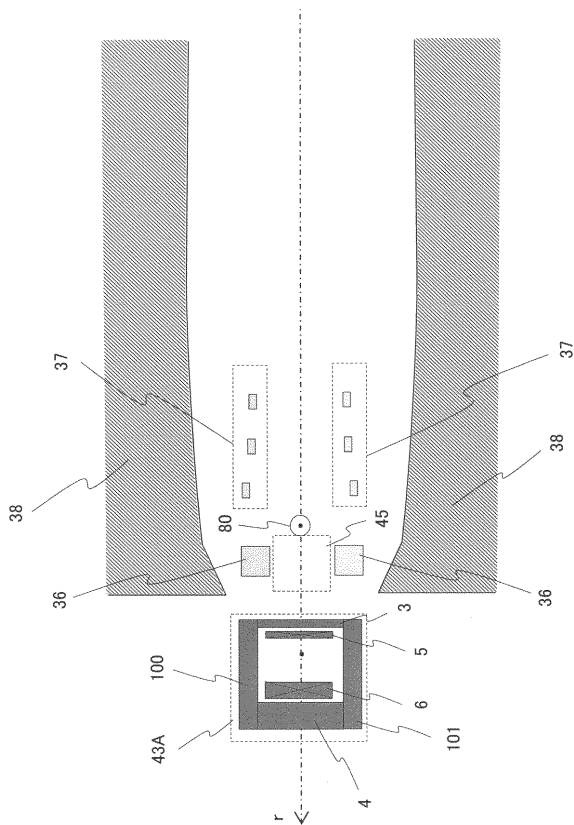
【図 9】



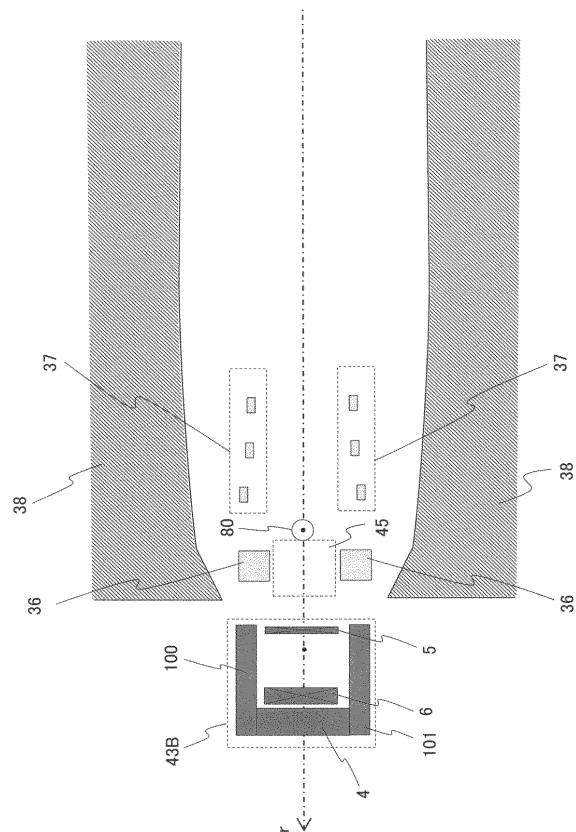
【図 10】



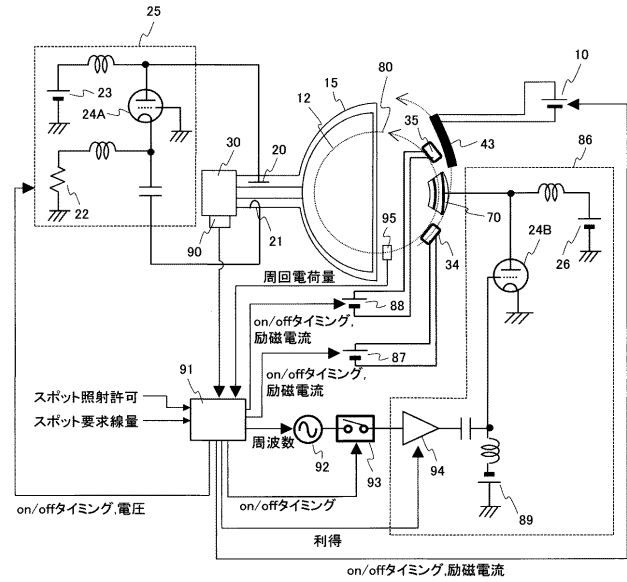
【図 11】



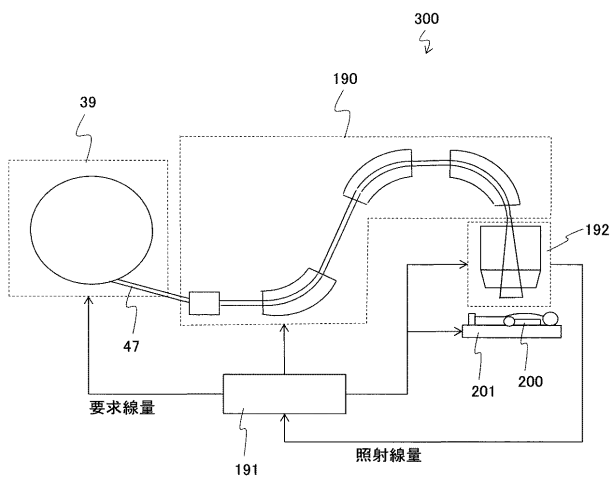
【図 12】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

(72)発明者 関 孝義

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

Fターム(参考) 2G085 AA11 BA13 BA19 BC09 BC10 BC11 CA05 CA06 CA13 CA15

CA16 CA17 CA21 CA22 CA24 EA07

4C082 AA01 AC05 AE01 AG13