

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)公開番号

特開2023-122453

(P2023-122453A)

(43)公開日 令和5年9月1日(2023.9.1)

(51)国際特許分類	F I	テーマコード(参考)
H 0 5 H 13/02 (2006.01)	H 0 5 H 13/02	2 G 0 8 5
H 0 5 H 7/10 (2006.01)	H 0 5 H 7/10	4 C 0 8 2
G 2 1 K 5/04 (2006.01)	G 2 1 K 5/04	A
A 6 1 N 5/10 (2006.01)	G 2 1 K 5/04	C
	A 6 1 N 5/10	H
審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全22頁)		

(21)出願番号	特願2022-26174(P2022-26174)	(71)出願人	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
(22)出願日	令和4年2月22日(2022.2.22)	(74)代理人	110000279 弁理士法人ウィルフォート国際特許事務所
		(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
		(72)発明者	横井 武一郎 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	えび 名 風太郎 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】 加速器および加速器を備える粒子線治療システム。

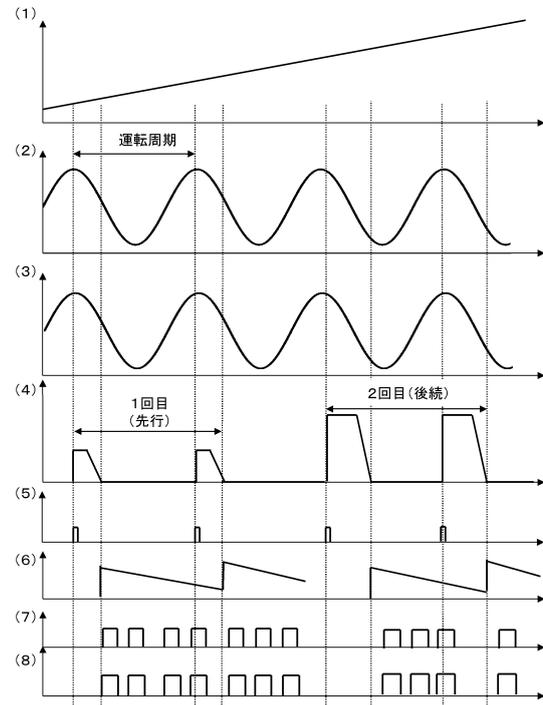
(57)【要約】

【課題】効率よくビームを生成することができる加速器および加速器を備える粒子線治療システムを提供すること。

【解決手段】

加速器は、主磁場と周波数変調された高周波電場とにより、イオン源から供給されたイオンを加速してビームを生成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、イオン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、加速高周波とは異なる周波数であって、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、擾乱磁場領域を形成する擾乱磁場領域形成部と、ビーム取り出し用のセプタム電磁石と、を備え、ビームの取り出し中において、イオン源から新たなイオンが供給されて加速される(図11(1)-(8))。

【選択図】図11



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

主磁場と周波数変調された高周波電場とにより、イオン源から供給されたイオンを加速してビームを生成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、イオン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異なる周波数であって、前記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、

擾乱磁場領域を形成する擾乱磁場領域形成部と、

ビーム取り出し用のセプタム電磁石と、を備え、

前記ビームの取り出し中において、前記イオン源から新たなイオンが供給されて加速される

加速器。

【請求項 2】

主磁場と周波数変調された高周波電場とにより、イオン源から供給されたイオンを加速してビームを生成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、イオン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異なる周波数であって、前記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、

複数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、

ビーム取り出し用のセプタム電磁石と、を備え、

あるサイクルで前記イオン源から供給されたイオンが、前記サイクルより前の他サイクルで供給されたイオンであって既に周回しているイオンと略同一のエネルギーを持つまで加速される

加速器。

【請求項 3】

イオンを加速してビームを生成する加速器であって、

対向して配置される一对の磁石であって、その間に磁場を形成するための磁極を有する前記一对の磁石と、

イオンを前記一对の磁石間へ出力するイオン源と、

前記イオンを加速する加速用電場を形成する加速電極と、

前記加速用電場の周波数を変調するための変調部と、

前記一对の磁石の磁極間に配置され、前記磁極が形成する磁場により周回する前記イオンに対して安定領域からのキック作用を与えるキック部と、

前記イオンに動径方向の擾乱を与える擾乱用電場を発生させる擾乱部と、

前記加速用電場を制御する高周波電場制御部と、

前記加速用電場の振幅値を前記高周波電場制御部に入力する高周波電場振幅決定手段と

、

前記擾乱用電場を制御する擾乱強度制御部と、

を備え、

前記一对の磁石によって形成される、異なるエネルギーのイオンがそれぞれ周回する環状の複数のイオンの周回軌道が集約する領域と離散する領域を有しており、

前記変調部はある周期によって周期的に電場周波数を変調させ、

前記高周波電場振幅決定手段は、照射するビームのエネルギーに応じて電圧振幅を定めるものであり、

前記イオン源は、前記加速用電場の周波数が特定の値となる期間にイオンを出力し、

前記イオンが出力される周波数の値は、取り出されるビームのエネルギーに対応する周回周波数とずれており、

10

20

30

40

50

前記イオン源から出力されたイオンが、別のサイクルで出力されたイオンであって、既に周回している状態のイオンとエネルギーが略同一となるまで加速される加速器。

【請求項 4】

さらに、ビーム量監視手段を備え、

前記ビーム量監視手段によって得られる周回ビーム量に基づいて、前記イオンを出力するか否かを判断する

請求項 1 に記載の加速器。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の加速器で加速されたイオンを標的に照射する照射装置と、

前記加速器および前記照射装置を制御する制御装置と、を備える

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、加速器および加速器を備える粒子線治療システムに関する。

【背景技術】

【0002】

粒子線治療や物理実験などで使用する高エネルギーのイオンビームは、加速器を用いて生成される。核子当たりの運動エネルギーが 200 MeV 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、サイクロトロンやシンクロトロン、特許文献 1 に記載されているようなシンクロサイクロトロン、特許文献 2 に記載されているような可変エネルギー加速器が知られている。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。サイクロトロンおよびシンクロトロンでは、加速されるにつれてビームは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り出される。そのため取り出すビームのエネルギーは、基本的には固定される。

【0003】

特許文献 1 のシンクロサイクロトロンでは、半径 R の略円形の断面を有する一对の強磁性体のポールが、中心軸を一致させて、正中面を挟んで上下に配置されている。一对のポールは、ギャップによって離隔され、このギャップは、正中面に対して実質的に対称なプロファイルを有するキャビティを形成している。ギャップの高さは、ポールの半径方向において変化している。ギャップの高さは、中心軸では H_{center} であり、中心軸から半径 R/2 までの円形の部分では、半径が大きくなるにつれて H_{center} から徐々に増大し、半径 R/2 において最大値 H_{max} となる。半径 R/2 より大きい環状の部分では、半径が大きくなるにつれて、そのギャップの高さが徐々に減少し、ポールの縁におけるギャップの高さは、 H_{edge} である。このようなギャップ形状のキャビティを備えるシンクロサイクロトロンは、ギャップ内の磁場を最小化する一方で、シンクロサイクロトロンのサイズを最小化できると特許文献 1 には開示されている。

【0004】

特許文献 2 には、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して、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、およびセプタムコイルを有するセプタム電磁石と、を備えたことを特徴とする加速器が記載されている。

10

20

30

40

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特表2013-541170号公報

【特許文献2】特開2020-38797号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

粒子線治療では、治療計画などで予め定められた照射線量の許容範囲を超過することなく、照射対象の腫瘍にビームを照射することが求められる。特許文献1のシンクロサイクロトロンを用いる粒子線治療装置では、シンクロサイクロトロンの一運転周期内で加速し取り出しの可能なビーム量を、照射線量の許容範囲に対して十分小さくする必要が有る。よって、特許文献1では、一運転周期に加速する電荷量が加速器の性能で決まる上限より小さくせざるを得ず、照射完了に時間がかかる。

10

【0007】

特許文献2の可変エネルギー加速器は、取り出しビームのエネルギーが可変であるため、治療計画で定められた照射線量に合わせたエネルギーのビームを出射できる。よって、可変エネルギー加速器は、シンクロサイクロトロンと比較して、粒子線治療のビーム照射時間を短縮できる。可変エネルギー加速器は、加速器サイズにおいても、サイクロトロンやシンクロサイクロトロンと同等であり、小型である。そのため、可変エネルギー加速器は、粒子線治療装置の加速器として、ビーム照射時間のさらなる短縮が期待されている。しかしながら、特許文献2に記載の加速器の運転方法において、加速器は数ms程度のサイクルで動作する。このサイクル中にイオン源から加速器にイオンを入射する期間と、イオンを加速する期間と、入射したイオンを全量照射してから再度入射するまでの期間などで、イオンビーム（以下、ビーム）を取り出すことができない。

20

【0008】

本発明の目的は、効率よくビームを生成することができる加速器および加速器を備える粒子線治療システムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記課題を解決すべく、本発明に従う加速器は、主磁場と周波数変調された高周波電場とにより、イオン源から供給されたイオンを加速してビームを生成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、イオン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、加速高周波とは異なる周波数であって、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、擾乱磁場領域を形成する擾乱磁場領域形成部と、ビーム取り出し用のセプタム電磁石と、を備え、ビームの取り出し中において、イオン源から新たなイオンが供給されて加速される。

30

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、効率よくビームを生成し、取り出すことができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施例1の加速器の全体概形図。

【図2】加速器の内部構造。

【図3】周回中のビームエネルギーと周回周波数の関係図。

【図4】設計軌道形状の説明図。

【図5】周回中のビームエネルギーと設計軌道上磁場との関係図。

【図6】ディー電極に励起される高周波モードの概略図。

【図7】高周波パケツの概形図。

【図8】加速終了直前の位相空間を示す説明図。

50

【図 9】加速終了直後の位相空間を示す説明図。

【図 10】加速器の制御ブロック図。

【図 11】加速器の運転のタイミングチャート。

【図 12】加速器の制御処理を示すフローチャート。

【図 13】ビーム量を測定する処理のフローチャート。

【図 14】実施例 3 に係り、高周波空洞の構造例。

【図 15】粒子線治療システムの全体構成図。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、図面に基づいて、加速器を説明する。本実施形態では、イオンを入射（イオンの出力）するプロセス、入射されたイオンを加速するプロセス、加速されたイオン（ビーム）を取り出すプロセス、減速プロセスという時間的に直列なプロセスを並列的に実行する。本実施形態では、入射プロセスおよび加速プロセスを繰り返して実行し、照射エネルギーに対応するビームが常に加速器内に補充されている状態を維持する。これにより、本実施形態では、入射プロセス、加速プロセスおよび取り出しプロセスを同時並行して実行することができるため、ビームを照射できない時間を短くし、効率を高めることができる。

【0013】

さらに、本実施形態で述べる加速器を備える粒子線治療システムでは、加速器の制御の面で照射不可能な時間を削減することができ、ビームを照射可能な時間的割合を増加させて、治療時間を短縮することができる。

【0014】

本実施形態に係る加速器 1 は、図 1 ~ 図 13 で後述するように、イオンを加速する加速用電場を形成する高周波加速空洞 21 と、加速用電場の周波数を変調するための回転式可変容量キャパシタ 212 と、磁極 123 が形成する磁場により周回するイオンに対して安定領域からのキック作用を与える付加磁場発生用シム 311 と、付加磁場発生用シム 311 によってキック作用が与えられたイオンを加速器 1 から取り出すための擾乱用電場を発生させる擾乱用電極 313 と、加速用電場を制御する低レベル高周波発生装置 42 と、擾乱用電場を制御する擾乱高周波制御装置 47 と、を備え、異なるエネルギーのイオンがそれぞれ周回する環状の複数のイオンの周回軌道が集約する領域と分散する領域を有しており、異なるサイクルで入射されたイオンが同時に略同一のエネルギーで周回させる。

【実施例 1】

【0015】

図 1 ~ 図 13 を用いて第 1 実施例を説明する。本実施例の加速器 1 は、周波数変調型の可変エネルギー加速器である。この加速器は時間的に一定な磁場を主磁場として持ち、主磁場中を周回する陽子を高周波電場によって加速する円形加速器である。その外観を図 1 に示す。

【0016】

図 1 に示すように、加速器 1 は、上下に分割可能な電磁石 11 によって、加速・周回中のビームが通過する領域（以下、ビーム通過領域 20（図 2 参照）と呼ぶ）内に主磁場を励起する。電磁石 11 は「一对の磁石」の例である。電磁石 11 の内側は、図示を省略した真空ポンプによって真空引きされている。

【0017】

電磁石 11 には、外部とビーム通過領域 20 とを接続するための貫通口が複数設けられている。例えば、加速されたビームを取り出す取り出しビーム用貫通口 111、電磁石 11 内に配置されたコイル導体を外部に引き出すための引き出し用の貫通口 112、113、高周波電力入力用貫通口 114 等の、各種貫通口が電磁石 11 の上下の分割接続面の面上に設けられている。

【0018】

高周波電力入力用貫通口 114 を通じて、イオンを加速してイオンビームとするための加速用電場を形成する高周波加速空洞（加速電極）21 が設置されている。「加速高周波

印加装置」の例である高周波加速空洞 2 1 には、後述のように、加速用のディー電極 2 2 1 (図 2 参照) と、加速用電場の周波数を変調するための回転式可変容量キャパシタ (変調部) 2 1 2 とが設置されている。

【 0 0 1 9 】

電磁石 1 1 の上部の中心からずれた位置に、水素イオンを供給するためのイオン源 1 2 が設置されている。イオン源 1 2 は、ビーム入射用貫通口 1 1 5 および入射部 1 3 0 (図 2 参照) を通して、イオンを加速器 1 内部の電磁石 1 1 間に入射する。入射部 1 3 0 には、貫通口 1 1 5 を通じて、外部からビーム通過領域 2 0 へイオンを入射するのに必要な電力が供給されている。

【 0 0 2 0 】

加速器 1 の内部構造について図 1 および図 2 を用いて説明する。図 2 は、電磁石 1 1 を上下に分割した面を上から見たときの機器配置を示す図である。

【 0 0 2 1 】

図 1 に示すように、電磁石 1 1 の上下部それぞれは、円筒状のリターンヨーク 1 2 1 および天板 1 2 2 を有しており、その内部側には、図 2 に示すように、円柱状の磁極 1 2 3 を有している。上下対向した磁極 1 2 3 によって挟まれる円筒状の空間内に、上述のビーム通過領域 2 0 がある。この上下の磁極 1 2 3 が互いに対向している面を磁極面と定義する。また磁極面に挟まれた磁極面に平行かつ上下の磁極面から互いに等距離にある面を軌道面と呼ぶ。

【 0 0 2 2 】

磁極 1 2 3 とリターンヨーク 1 2 1 の間に形成される凹部には、円環状のコイル 1 3 が磁極 1 2 3 の外周側の壁に沿って設置されている。コイル 1 3 に電流を流すことによって上下対向する磁極 1 2 3 が磁化し、ビーム通過領域 2 0 に後述する所定の分布で磁場が励起される。

【 0 0 2 3 】

高周波加速空洞 2 1 は、 / 4 型の共振モードによって加速ギャップ 2 2 3 にイオンを加速するための加速用高周波電場を励起させる。高周波加速空洞 2 1 のうち、加速器 1 に対して固定的に設置された部分をディー電極 2 2 1 と定義する。高周波加速空洞 2 1 は、貫通口 1 1 4 を通じて、ビーム通過領域 2 0 の一部領域を囲むディー電極 2 2 1 を形成する。イオンは、ディー電極 2 2 1 とこのディー電極 2 2 1 に対向するように配置される接地電極 2 2 2 とによって挟まれる領域である加速ギャップ 2 2 3 により励起される高周波電場によって加速される。前述のビームの周回周波数に同期するために、高周波電場の周波数は、ビームの周回周波数の整数倍であることが必要である。加速器 1 では、高周波電場の周波数はビームの周回周波数の 1 倍としている。

【 0 0 2 4 】

磁極 1 2 3 には、磁場の微調整用のトリムコイル 3 3 が複数系統設けられている。トリムコイル 3 3 は、貫通口 1 1 2 , 1 1 3 を通じて外部電源に接続されている。各系統別に励磁電流を調整することで、後述の主磁場分布に近づけ、安定なペータロン振動を実現するように、運転前にトリムコイル電流が調整される。

【 0 0 2 5 】

上述の加速器 1 では、イオン源 1 2 で生成されたイオンは、入射部 1 3 0 の引き出し電極に印加された電圧によって、低エネルギーのイオンの状態でビーム通過領域 2 0 に引き出される。入射されたイオンは、高周波加速空洞 2 1 によって励起される高周波電場によって、加速ギャップ 2 2 3 を通過する毎に加速され、イオンビームとなる。

【 0 0 2 6 】

図 2 に示すように、ビームを加速器 1 の外部へ取り出すために、四極磁場や六極以上の多極磁場を励磁する二か所の付加磁場発生用シム (キック部) 3 1 1 と高周波電場を印加する擾乱用電極 (擾乱部) 3 1 3 とが、磁極面の一部に電氣的に絶縁された状態で設置されている。磁極面の端部の一か所に取り出し用セプタム電磁石 3 1 2 の入射部が設置されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 7 】

擾乱用電極 3 1 3 は、微小な振幅の高周波 (R F) 電場を印加することが可能であり、周回中の粒子を軌道面内方向にキックし、設計軌道から粒子を外れさせる。その軌道が設計軌道から外れた粒子は、付加磁場発生用シム 3 1 1 の近くを通過する。

【 0 0 2 8 】

付加磁場発生用シム 3 1 1 による磁場は、ビーム通過領域 2 0 中を周回するイオンビームに対して安定領域を制限し、安定領域外に出た粒子を取り出し用セプタム電磁石 3 1 2 へ導入する。一对の付加磁場発生用シム 3 1 1 は、それぞれ逆極性の磁場を磁極 1 2 3 が形成する主磁場に対して重畳励磁する。

【 0 0 2 9 】

擾乱用電極 3 1 3 に適当な周波数の高周波電圧を印加することでビームに擾乱を与えると、後に述べる原理により、擾乱用電極 3 1 3 に印加される R F 電場のオン / オフに同期して、ビームのオン / オフ制御が可能となる。これら付加磁場発生用シム 3 1 1 および擾乱用電極 3 1 3 の詳細は後述する。

【 0 0 3 0 】

軌道面において主磁場の面内成分がほぼ 0 となるように、上下の磁極 1 2 3、コイル 1 3、トリムコイル 3 3、付加磁場発生用シム 3 1 1、取り出し用セプタム電磁石 3 1 2、擾乱用電極 3 1 3 の形状と配置が設計されており、軌道面に対して面对称の配置および電流分布となっている。磁極 1 2 3、ディー電極 2 2 1、コイル 1 3、トリムコイル 3 3、擾乱用電極 3 1 3 の形状は、図 2 に示すように、加速器 1 を上面側から見たときに、貫通口 1 1 4 の中心部と貫通口 1 1 2 の中心部とを結ぶ線分に対して、左右対称の形状となっている。

【 0 0 3 1 】

加速器 1 内を周回するビームの軌道および運動について述べる。ビームは、ビーム通過領域 2 0 中を周回しながら加速される。加速器 1 から取り出し可能なビームの運動エネルギーは、最小 7 0 M e V、最大 2 3 5 M e V である。運動エネルギーが大きいほどビームの周回周波数は小さくなる。入射直後の運動エネルギーのビームは 7 6 M H z で、運動エネルギー 2 3 5 M e V に達したビームは 5 9 M H z で、ビーム通過領域 2 0 中を周回する。これらのエネルギーと周回周波数の関係は図 3 のようになる。図 3 の縦軸は周回周波数を示し、図 3 の横軸は運動エネルギーを示す。

【 0 0 3 2 】

図 5 に示すように、形成される磁場は、ビームの軌道に沿って一様、かつエネルギーが高くなるにつれ磁場が低下していくような分布を作る。つまり、径方向外側の磁場が低下するような磁場を形成する。このような磁場下においては、ビームの軌道面内の動径方向と軌道面とに対して垂直な方向のそれぞれに対して安定にベータトロン振動する。

【 0 0 3 3 】

図 4 に各エネルギーの軌道を示す。図 4 には複数の周回軌道が示されている。図 4 では、最も外側に最大エネルギー 2 5 2 M e V の軌道に対応した半径 0 . 4 9 7 m の円軌道が存在し、そこから、エネルギー 0 M e V まで磁気剛性率で 5 1 分割した計 5 1 本の円軌道が示されている。点線は、各軌道の同一の周回位相を結んだ線であり、この線を等周回位相線と呼ぶ。

【 0 0 3 4 】

図 4 に示すように、加速器 1 では、ビームの加速に従って、ビームの軌道中心 (設計軌道) が軌道面内で一方向に移動する。設計軌道が移動する結果、異なる運動エネルギーの軌道が互いに近接している箇所 (周回軌道が集約する領域) と、互いに遠隔している領域 (周回軌道が離散する領域) とが存在する。つまりビームの設計軌道が偏心している。

【 0 0 3 5 】

最も設計軌道同士が近接している設計軌道の各点を結ぶと、すべての設計軌道に直交する線分となる。最も設計軌道同士が遠隔している設計軌道の各点を結ぶと、すべての設計軌道に直交する線分となる。これら二つの線分は、同一直線上に存在する。この直線に対

10

20

30

40

50

称軸と定義すると、設計軌道の形状は対称軸を通り、軌道面に垂直な面に対して面对称となる。

【0036】

図4に示す等周回位相線は、集約領域から周回位相 / 20ごとにプロットされている。ディー電極221とディー電極221に対向する接地電極222との間に形成される加速ギャップ223は、集約点から見て±90度周回した等周回位相線に沿って、設置されている。

【0037】

上記のような軌道構成と軌道周辺での安定な振動とを生じさせるために、加速器1では、設計軌道の偏向半径方向外側に行くにつれて、磁場の大きさが小さくなる主磁場分布として、設計軌道に沿って磁場は、一定とする。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て、その軌道半径・周回時間は増大する。

10

【0038】

このような体系では、設計軌道から半径方向へ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へ主磁場から復元力を受ける。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、設計軌道からずれた粒子には、設計軌道に戻そうとする向きに常に復元力が働き、設計軌道の近傍を振動することになる。これにより、安定にビームを周回させ加速させることが可能である。この設計軌道を中心とする振動をベータatron振動と呼ぶ。各エネルギーのビームにおける磁場の値を図5に示した。磁場は、入射部130で最大の5 Tとなり、最外周では4.91 Tまで低下する。

20

【0039】

上述の主磁場分布は、コイル13とそれを補助するトリムコイル33とに所定の励磁電流を流して、磁極123が磁化されることにより、励起される。イオンの入射部130で磁場を大きくし、外周に向かって磁場を小さくする分布を形成するために、磁極123が対向する距離(ギャップ)は入射部130において最も小さく、外周に向かって大きくなる形状となる。さらに、磁極123の形状は、ギャップ中心を通る平面(軌道面)に対して面对称の形状であり、軌道面上では軌道面に垂直な方向の磁場成分のみを持つ。さらに、磁場分布の微調整を、磁極面に設置されたトリムコイル33に印加する電流を調整することで行い、所定の磁場分布を励起させる。

30

【0040】

上述のように、高周波加速空洞21は、加速ギャップ223に電場を励起させる。そのために、外部高周波電源(図10の低レベル高周波発生装置42およびアンプ43を参照)から入力ケーブル211を通じて高周波電力が導入され、ディー電極221と接地電極222の間の加速ギャップ223に高周波電場が励起される。

【0041】

一般に、ディー電極221が励起する電磁場は、電極形状によって定まる特定の共振周波数および空間分布の電磁場となる。特定の周波数と空間分布を持つ電磁場を固有モードと称する。固有モードには複数種類あり、加速のために励起するモードを基本モードと称する。基本モードの電磁場分布と表面電流分布を図6に示す。図6には、共振器の外形、太矢印にて電場の分布(E)、点線矢印で磁場の分布(B)、実線矢印で共振器表面の電流分布(j)の概形を示している。基本モードではギャップのいたるところで、ディー電極221から設置電極222に対して同じ向きの電場が生じる。

40

【0042】

加速器1は、ビームの周回に同期して高周波電場を励起するために、電場の周波数を周回中のビームのエネルギーに対応して変調させる。本実施例の共振モードを用いた高周波加速空洞21では、共振の幅よりも広い範囲で、高周波の周波数を掃引する必要がある。そのために、高周波加速空洞21の共振周波数も変更する必要がある。その制御は、高周波加速空洞21の端部に設置された回転式可変容量キャパシタ212の静電容量を変化させることで実施する。回転式可変容量キャパシタ212は、回転軸213に直接接続された

50

導体板と外部導体（いずれも図示せず）との間に生じる静電容量を、回転軸 2 1 3 の回転角によって制御する。すなわち、ビームの加速に伴って、回転軸 2 1 3 の回転角を変化させる。

【 0 0 4 3 】

加速器 1 のビーム入射から取り出しまでのビームの挙動を述べる。まずイオン源 1 2 から低エネルギーのイオンが出力され、ビーム入射用貫通口 1 1 5 および入射部 1 3 0 を介してビーム通過領域 2 0 へ低エネルギーのイオンビームが導かれる。

【 0 0 4 4 】

ビーム通過領域 2 0 に入射されたビームは、高周波電場による加速を受けながら、そのエネルギーが増大するとともに、軌道の回転半径を増加させていく。その後ビームは、高周波電場による進行方向安定性を確保しながら加速される。

10

【 0 0 4 5 】

ビームの重心は、高周波電場が最大となる時刻に加速ギャップ 2 2 3 を通過するのではなく、時間的に高周波電場が減少しているときに加速ギャップ 2 2 3 を通過する。高周波電場の周波数とビームの周回周波数とはちょうど整数倍の比で同期させているため、所定の加速電場の位相で加速された粒子は、次のターンもほぼ同じ位相で加速を受ける。一方、加速位相より早い位相で加速された粒子は、加速位相で加速された粒子よりもその加速量が大きいため、次のターンでは遅れた位相で加速を受ける。逆に有るときに加速位相より遅い位相で加速された粒子は、加速位相で加速された粒子よりもその加速量が小さいため、次のターンでは進んだ位相で加速を受ける。

20

【 0 0 4 6 】

このように、所定の加速位相からずれたタイミングの粒子は、加速位相に戻る方向に動き、この作用によって、運動量と位相からなる位相平面（進行方向）内においても安定に振動することができる。この振動をシンクロトロン振動と呼ぶ。すなわち、加速中の粒子はシンクロトロン振動をしながら、徐々に加速され、取り出される所定のエネルギーまで達する。安定なシンクロトロン振動をする間、個々の粒子は、位相平面上に高周波バケツと呼ばれる安定領域内で回転運動をする。

【 0 0 4 7 】

図 7 に位相平面上の高周波バケツ B u の形状とその内部を動く粒子の軌跡との模式図を示す。この高周波バケツ B u の運動両方向の幅は加速空胴に印加する電圧振幅の平方根に比例すること、および、高周波バケツ B u の面積が単位時間当たりのビームのエネルギー増加（加速速度）に対して単調現象であることは、それぞれ知られている。

30

【 0 0 4 8 】

回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 の回転速度によって決まる運転周期下では、加速速度は自然と決まる。したがって、ある電圧振幅以下では高周波バケツ B u の面積が 0 となり、安定なシンクロトロン振動を実現できない。高周波バケツ B u の面積が初めて 0 を超える電圧振幅を臨界電圧 V_c と呼ぶことにすると

【 0 0 4 9 】

臨界電圧 V_c は、加速中のビームエネルギーに対して単調増加となる。逆に一定の電圧振幅になるように高周波加速空胴 2 1 に対して高周波電力を入力したとき、ビームの加速に伴い、高周波バケツ B u の面積は徐々に小さくなる。高周波バケツ B u の面積が徐々に小さくなる状況下においては加速中のビームの運動量分散も小さくなる。

40

【 0 0 5 0 】

所定の取り出しビームを目標のエネルギーで取り出すために、高周波加速空胴 2 1 に印加されている高周波電場が徐々に低くなり目標エネルギーに達したところで、高周波電場の振幅が 0 となるように、制御装置 4 0 は外部高周波電源からの出力を制御する。これにより、ビームは、目標エネルギーにて安定に周回する。そして、擾乱用電極 3 1 3 に高周波が印加される。

【 0 0 5 1 】

その高周波の周波数は、ビームのベータトロン振動の周波数に一致している。ビームは

50

、その進行方向の位置、すなわち擾乱用電極 3 1 3 を通過する時刻に依存する擾乱を受ける。特定の粒子に着目すると、擾乱用電場と周回のベータトロン振動の周波数とが一致しているため、両者は共鳴し、ある粒子のベータトロン振動振幅が増大する。ベータトロン振動振幅が増大し続けると、設計軌道の外側に設置された付加磁場発生用シム 3 1 1 が励起するキック磁場の作用を受けて、急激にベータトロン振動が発散し、設計軌道から見て外側にビームが変位する。その結果、ビームは、取り出し用セプタム電磁石 3 1 2 に導入される。この安定領域と不安定領域との境界を、セパラトリクスと称する。

【 0 0 5 2 】

上記目標エネルギーに達してから取り出されるまでの間、ビームを構成する個々の粒子は、付加磁場発生用シム 3 1 1 由来の四極磁場と六極以上の多極磁場とによって、ビームの水平方向の位置と傾きで定まる位相空間上において、安定に周回できる領域と不安定に軌道ずれが増大し続ける領域とに分けられた状態で、周回する。

10

【 0 0 5 3 】

セパラトリクスの内側に存在する粒子は、安定にベータトロン振動を続ける。セパラトリクスの外にいる粒子は、付加磁場発生用シム 3 1 1 によるキック作用が周回ごとに蓄積されるため、設計軌道に対して水平方向に大きな変位を生じる。水平方向に大きな変位を生じた粒子は、後述の擾乱用電極 3 1 3 による擾乱用電場と、あらかじめ設置された取り出し軌道 3 2 2 上の取り出し用セプタム電磁石 3 1 2 によって形成される磁場とによって、取り出し軌道 3 2 2 上を通り、加速器 1 の外へ取り出される。

【 0 0 5 4 】

擾乱用電極 3 1 3 に印加される電場が切られると、ビームのベータトロン振動振幅の増大が停止し、安定領域内でビームが周回する。これにより、ビームの取り出しを停止することができる。

20

【 0 0 5 5 】

上記ビームの取り出しのプロセスにおいて、周回中のビームの運動量分散を抑制することは、ビームの空間的な広がりを抑えることができ、セプタム電磁石 3 1 2 などに衝突して失われるビームの量を減らすのに有効である。したがって、前述の高周波バケツの面積は、加速終了時点となるべく小さくし、周回中のビームの運動量分散を抑制することが望ましい。

【 0 0 5 6 】

しかも、加速電場の減衰には、高周波加速空洞 2 1 の共振の Q 値に基づいて、ある程度の時間がかかる。典型的には Q 値は 3 0 0 0 程度であり、高周波加速空洞 2 1 への電力入力を停止した時刻から 3 0 0 0 周期程度の時間で高周波電圧振幅が小さくなり、高周波バケツが消失する。高周波電圧振幅の減衰中には、高周波バケツの収縮に伴い、高周波バケツからこぼれる時刻によって各粒子の到達エネルギーがばらつく。高周波バケツの消失に時間をかけるほど、その時間に比例してその後の周回ビームの運動量分散が広がる。

30

【 0 0 5 7 】

以上より、加速中の高周波電圧振幅は、高周波バケツを形成できるように、そして加速できるビームの電荷量が充分確保できるならば、高周波バケツはなるべく小さく維持することが、取り出し効率の向上や結果的に照射時間の短縮に有効である。

40

【 0 0 5 8 】

しかしながら、高周波振幅の電圧を過少にすると、加速途中で高周波バケツが消失し、ビームを目的のエネルギーまで加速できないことも起きえる。たとえば、7 0 M e V まで加速する際の最適な高周波電圧振幅の値が存在する。しかし、その高周波電圧振幅値で 2 3 5 M e V まで加速しようとしても、加速途中で高周波バケツが消失してしまうため、2 3 5 M e V まで加速できない。

【 0 0 5 9 】

すなわち、目標とする到達エネルギーに応じて、取り出し効率あるいは照射時間の観点で最適な電圧振幅が存在する。その最適な電圧振幅で高周波を励起することで、取り出し効率の向上あるいは照射時間の短縮を実現できる。本実施例の加速器 1 は、上述した、到達

50

エネルギーと電圧振幅との対応関係を保持する電圧振幅計算装置 4 5 を備える。

【 0 0 6 0 】

以上、1 サイクル中の、ビームの入射から取り出しに関するビームのふるまいについて述べた。加速器 1 は、以降のサイクルも同様の動作を繰り返す。2 サイクル目以降では、すでに加速されたビームが所定のエネルギーでビーム通過領域 2 0 内を周回中である。この場合、加速済みのビームに対しても、2 サイクル目のビームを加速する高周波電場が作用する。しかし、加速済みのビームにとっては、入射直後のビームを加速する高周波はその周波数が周回周波数とマッチしないため、エネルギーが微小に振動するに過ぎない。よって、2 サイクル目のビームが十分加速済みのビームのエネルギーに近づくまでは、加速済みのビームは、ほとんどエネルギーや運動の状態を変化させることなく安定に周回しながら一部は取り出されていく。既に周回中のビームを先行ビームと、その後が発生するビームを後続ビームと、呼ぶこともできる。

10

【 0 0 6 1 】

2 サイクル目のビーム（後続ビーム）のエネルギーが加速済みのビーム（先行ビーム）のエネルギーに近接すると、より具体的には位相空間上で 2 サイクル目のビームを内包する高周波パケツが加速済みのビームが存在している領域に重なり始めると、はじめて加速済みのビームに対して有意な影響が高周波から及ぼされる。

【 0 0 6 2 】

図 8 は、このタイミングでの位相空間上の分布についての模式図である。図 8 のグレーに網掛けした領域 A 1 が加速済みの周回ビームが存在する領域であり、ここに 2 サイクル目のビームを内包する高周波パケツ B u が入る。

20

【 0 0 6 3 】

前述の通り、高周波パケツは、運動量分散が小さくなるように適切な形状に制御されており、その運動量方向の高さは周回中のビームよりも小さい。高周波パケツと周回中のビームとが近接すると、周回中のビームは高周波パケツに入ることができず、高周波パケツに押しのけられるように位相空間上の別の位置に移動する。

【 0 0 6 4 】

図 9 に、2 サイクル目のビームを加速完了した瞬間の位相空間におけるビームの分布を示す。図 9 に示す瞬間では、高周波パケツは、先行ビームがすでに周回している領域を通過し、その影響で先行ビームの分布が乱され、運動量分散が増加している。さらに 2 サイクル目ビーム（後続ビーム）が高周波パケツの収縮とともにパケツからこぼれ、位相空間上のある領域に配置される。加速済みのビームと新たに加速されたビームとの位相空間上の領域は、このタイミングでは明確な境界をもつ。図 9 では、加速済みのビーム（先行ビーム）が存在する領域 A 2 をドット柄で示し、新たに加速されたビーム（後続ビーム）の存在領域 A 3 を斜線で示す。このように、周回ビームの運動量分散が増える代わりに、新たなビームを追加することが可能となる。

30

【 0 0 6 5 】

図 1 0 および図 1 1 を用いて、上述の原理によってビームを加速し、加速器 1 の外へ取り出すときの各機器の制御ダイアグラムと運転フローを説明する。図 1 0 に本実施例の加速器 1 の制御ブロック図を示す。

40

【 0 0 6 6 】

ビームを加速するための構成とその制御系としては、図 1 0 に示すような、高周波加速空洞 2 1 に付随する回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 と、回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 の回転軸 2 1 3（図 1 参照）に接続されるサーボモータ 2 1 4 と、サーボモータ 2 1 4 を制御するモーター制御装置 4 1 とがある。さらに、高周波加速空洞 2 1 に高周波電力を入力するための入力カプラ 2 1 1（図 1 参照）と、供給する高周波電力を生成する低レベル高周波発生装置 4 2 およびアンプ 4 3 がある。

【 0 0 6 7 】

回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 は、モーター制御装置 4 1 により制御される。モーター制御装置 4 1 は、全体制御装置 4 0 により制御される。全体制御装置 4 0 は、治療計画デー

50

データベース 60 中の治療計画データにより予め定められた指示値に基づいて、モータ制御装置 41 を制御する。

【0068】

予め定められた回転速度でサーボモータ 214 が回転すると、これにより回転軸 213 が回転する。回転軸 213 の回転角が時間的に変化することで、静電容量を時間的に変調される。これにより、基本モードの共振周波数が変化する。

【0069】

低レベル高周波発生装置 42 によって発生させた高周波信号をアンプ 43 によって増幅することで、高周波加速空洞 21 に入力される高周波を作る。低レベル高周波発生装置 42 において作る高周波信号の周波数は、前記の基本モードの共振周波数に追従させる。高周波信号の振幅は、治療計画データベース 60 によって定められており、全体制御装置 40 より指示される。

10

【0070】

高調波モード用の低レベル高周波を発生させる装置 42 によって発生させた高周波信号をアンプ 43 によって増幅することで、高周波加速空洞 21 へ入力される高周波電力を作る。高調波モード用低レベル高周波発生装置 42 により作られる高周波信号の周波数は、前記の高調波モードの共振周波数に追従させ、振幅は、治療計画データベース 60 によって定められたビームのエネルギーを電圧振幅計算装置 45 が参照し、電圧振幅計算装置 45 の演算によって定められた振幅値を全体制御装置 40 より指定される。

【0071】

ビームを加速器 1 外に取り出すための構成とその制御系としては、図 10 に示す、擾乱用電極 313 に高周波電圧を印加するための高周波電源 46 と、この高周波電源 46 を制御する擾乱高周波制御装置 47 とがある。

20

【0072】

高周波電源 46 から擾乱用電極 313 に出力される電圧値は、擾乱高周波制御装置 47 によって制御されている。高周波電源 46 から出力される電圧の指定値は、取り出しビームエネルギーと取り出しビームの出力電流とから一意に定まる値として治療計画データベース 60 内に保存された治療計画データによって定められている。全体制御装置 40 は、その治療計画データから指定値を取得し、擾乱高周波制御装置 47 へ指示する。

【0073】

図 11 および図 12 に基づいて、以上のような加速器 1 の制御系における、ある二種類のエネルギーのビームを連続的に取り出す際の各機器の動作（運転方法）を説明する。図 11 は、各機器の動作のタイミングチャートである。図 12 は、運転の流れをフローチャートである。

30

【0074】

図 11 のチャートの縦軸は、上から順に、(1) 回転式可変容量キャパシタ 212 の回転軸 213 の回転角、(2) 高周波加速空洞 21 の共振周波数、(3) 高周波加速空洞 21 に入力される高周波の周波数、(4) 加速ギャップ 223 における加速用高周波の振幅、(5) イオン源 12 が出力するビームの電流波形、(6) 取り出し可能な周回中の電荷量、(7) 擾乱用電極 313 に入力される擾乱高周波、(8) 加速器 1 から出力されるビーム電流波形、を示している。図 11 に示すチャートの横軸はすべて時間である。

40

【0075】

図 11 に示すように、回転式可変容量キャパシタ 212 の回転軸 213 の回転角によって、高周波加速空洞 21 の共振周波数は周期的に変化する。それに合わせて、低レベル高周波発生装置 42 から出力され、高周波加速空洞 21 へ入力される高周波信号の周波数も同期して変化する。ここで、共振周波数が最大となる時刻から次に最大となる時刻までの期間を運転周期と定義する。

【0076】

図 11 (5) に示すように、運転周期の開始直後から、イオン源 12 からビームが出力される。ビームは、安定なシンクロトロン振動が可能な範囲に入射された場合、加速され

50

る。これに対し、シンクロトロン振動が安定しない粒子は、加速できずに加速器 1 内部の構造物に衝突し、失われる。ここまでが図 1 2 に示す入射プロセスである。入射プロセスは、加速電圧の印加を開始するステップ S 1 1 と、イオン源からイオンを出力するステップ S 1 2 を含む。

【 0 0 7 7 】

図 1 1 に戻り、共振周波数が低下するにつれてビームは加速され、所定の取り出しエネルギー近くまで加速される。その後、高周波加速空洞 2 1 に入力される高周波の振幅を低下させ始める。この低下の開始タイミングは、イオンビームが目標エネルギーになる前の所定のタイミングから開始するようにする。例えば、高周波電力の入力を切ってから加速ギャップ 2 2 3 に生じていた加速用電場が 0 になるまでに、目標エネルギーに到達すると見込まれるエネルギーに達するタイミングから低下を開始させることが望ましい。ここまでが図 1 2 における加速プロセスである。加速プロセスは、イオンビームを加速するステップ S 1 3 と、加速電圧の印加を停止するステップ S 1 4 を含む。

【 0 0 7 8 】

図 1 1 に戻り、加速電場の振幅が十分小さくなった時点で、ビームは、所定の取り出しエネルギーに達している。加速が完了した時点で、取り出し可能なビーム量はある値になり、これよりビーム取り出しが可能となる。ビームは、付加磁場発生用シム 3 1 1 によって定められたセパトリティクス内を満たすように周回することになる。

【 0 0 7 9 】

次いで、擾乱用電極 3 1 3 による擾乱高周波を印加する。ビームを取り出す時間はあらかじめ定められている。周回中の全電荷がすべて取り出されるか、所定の照射線量が照射されるまで擾乱高周波を印加し、ビームを取り出し続ける。

【 0 0 8 0 】

この間、高周波加速空洞 2 1 に付随のサーボモータ 2 1 4 は回転を続け、共振周波数は変動を続ける。入射の周波数と共振周波数とが一致したら、イオン源から再度ビームを出力し、上記同様にビームを加速しつつ、ビームの取り出しも並行して進める。加速終了のごくわずかな時間（加速高周波振幅が減衰中）のみは、擾乱用高周波をオフして照射ビームのエネルギー変動を抑制する。高周波加速空洞 2 1 が作る加速用高周波は、加速プロセス中においてビームの周回周波数と一致しないため、ビームに対する影響はほとんど生じない。よって、ビームは一定のエネルギーで周回しながら、印加されている擾乱高周波によって順次取り出されていく。

【 0 0 8 1 】

擾乱高周波の強度によってはあるが、図 1 1 (6) に示すように、1 回目の加速が終了して以降、加速高周波の振幅が減衰中の期間を除き、常に周回電荷量が追加されているため、いつでもビームのオン/オフの制御が可能である。以上が図 1 2 に示す照射プロセスである。

【 0 0 8 2 】

照射プロセスは、取り出し高周波の印加を開始させるステップ S 1 5 と、取り出し高周波の印加を停止させるステップ S 1 6 と、照射プロセスが完了したか判定するステップ S 1 7 と、周回電荷量を測定するステップ S 1 8 と、次サイクルまでに照射できる電荷量と基準値とを比較するステップ S 1 9 を含む。ステップ S 1 7 において、照射プロセスが完了したと判定されると、図 1 2 に示す照射制御処理は終了する。照射プロセスが完了していない場合（S 1 7 : NO）、ステップ S 1 8 へ進む。ステップ S 1 9 において、次サイクルまでに照射できる電荷量が基準値よりも大きいと判定されると（電荷量 > 基準値）、ステップ S 1 5 へ戻る。次サイクルまでに照射できる電荷量が基準値以下であると判定されると（電荷量 < 基準値）、ステップ S 1 1 へ戻る。

【 0 0 8 3 】

図 1 1 に戻る。ある一つのエネルギーでの照射が終了すると、次の運転周期に到達するまでの間に、次の運転周期で取り出すべきイオンビームのエネルギーに対応したパターンでの運転が開始される。上記のプロセスを繰り返すことで、任意のエネルギーを任意の線量で照

10

20

30

40

50

射可能な加速器 1 が実現する。

【 0 0 8 4 】

図 1 1 に示した 2 回目の運転周期（後続するビームの運転周期）は、1 回目の運転周期（先行するビームの運転周期）とは異なるエネルギーを照射する場合のタイミングチャートを示す。

【 0 0 8 5 】

ここでは、後続ビームの照射エネルギーは、先行ビームの照射エネルギーと比較して、より大きい場合を説明する。図 1 1 (4) に示すように、後続ビームの運転が先行ビームの運転と異なるのは、加速高周波の振幅の値とその印加期間である。より大きなエネルギーまで加速するには、高周波の印加時間をより長くすることで実現される。前述のとおり、加速後の周回ビームの運動量分散を小さく抑制するために、エネルギー毎に電圧振幅計算装置 4 5 によって計算される振幅値が定められている。これにより高周波パケツを不要に大きくすることを避け、周回ビームの運動量分散を抑制できる。さらに、ビームの取り出し効率の増加とビーム照射時間の短縮とを実現できる。

10

【 0 0 8 6 】

上記の説明では、常に、イオンが入射可能なタイミングでイオンの入射を行うことを想定している。照射すべき電荷量と現に周回しているビーム量とを比較して、周回電荷量が十分に大きい場合は、新たなイオンの入射（イオン源 1 2 からのイオン出力）をしないことも考えられる。その場合は、加速器 1 にビーム量の監視手段として、電極型周回ビーム量モニタ B M（図 2 参照）が設置される。ビーム量モニタ B M は、ビーム軌道上の任意の場所に設置される電極であり、電極に励起される電圧および電荷量に比例する信号を取り出すことが可能である。あらかじめ定められた電荷量と比較して大きな電荷量が周回している場合は、イオンの入射をスキップさせる。

20

【 0 0 8 7 】

ビーム量の監視手段は他の方式でもよい。直接ビーム量を計測する必要はない。ビームの取り出し量と擾乱用高周波振幅との比は、周回ビーム量に関連する量であるため、その比からビーム量を推測するなどの方法でもよい。

【 0 0 8 8 】

例えば、加速空洞のピックアップ信号取得用のループアンテナ、または、入力カプラからの反射波モニタなどによって、ビーム周回量を計測することも可能である。その場合、ビームの周回周波数とビームのパンチ構造とを考慮してあらかじめ校正されており、ビームのエネルギーと加速停止からの経過時間とに基づいた校正テーブルが用意される。

30

【 0 0 8 9 】

図 1 3 に、ビーム量を計測する処理のフローチャートを示す。ビーム量計測処理は、例えば、加速電極のピックアップ信号を取得するステップ S 2 0、取得した信号の周波数を解析するステップ S 2 1、ビーム周波数に対応する信号強度を取得するステップ S 2 2、および、周波数特性と加速停止からの経過時間とでビーム量に換算するステップ S 2 3 を含む。

【 0 0 9 0 】

すなわち、ビーム量計測処理では、計測開始の後（S 2 0）、モニタ信号の特定周波数成分の信号を取り出し（S 2 1, S 2 2）、校正テーブルから周回ビーム量に換算する（S 2 3）。これにより、周回電荷量に基づいて、新たなイオンの入射をスキップさせるか否かを判定することができる。

40

【 0 0 9 1 】

高周波加速空洞 2 1 は、上述の構成に限定されない。例えば、高周波空洞の変調機構として、回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 による静電容量の変化に代えて、透磁率の変化を利用することもできる。空洞内部にフェライト磁性体を設置し、フェライト磁性体の性質である外部磁場による透磁率変化を利用することができる。

【 0 0 9 2 】

その場合の高周波加速空洞 2 1 の構造を図 1 4 に示す。図 1 4 は、加速空洞の一端が同

50

軸構造となった共振空洞であり、同軸構造部に内胴体と外導体で囲まれた間隙中にフェライト磁性体 231 が設置されている。フェライト磁性体 231 にはバイアス電流コイル 232 が巻かれており、外部の電源に接続されている。バイアス電流コイル 232 に印加する電流は、高周波周波数から決まる。フェライト磁性体 231 の透磁率がバイアス電流の値によって決まることから、あらかじめ共振周波数とバイアス電流の関係をテーブル化することが可能である。そこで、この種類の加速空洞を用いる場合、可変容量キャパシタを用いる変調と異なり、バイアス電流の制御によって高周波の周波数を制御する。

【0093】

このように構成される本実施例によれば、イオン入射プロセス、イオン加速プロセス、イオンビームの取出しプロセス、減速プロセスという時間的に直列なプロセスを並列的に実行することができる。本実施例の加速器 1 は、入射プロセスおよび加速プロセスを繰り返して実行し、照射エネルギーに対応するビームが常に加速器内に補充されている状態を維持する。したがって、本実施例の加速器 1 は、ビームを照射できない時間を短くし、ビーム取り出しの効率を高めることができる。

10

【実施例 2】

【0094】

実施例 2 を説明する。本実施例を含む以下の実施例では、実施例 1 との相違を中心に述べる。実施例 2 は、図示を省略するが、当業者であれば理解でき、実施可能である。

【0095】

実施例 1 では、加速核種を水素イオンとしたが、実施例 2 では、加速核種を炭素イオンとする。実施例 2 の加速器は、炭素イオンを、核子当り運動エネルギー $140 \text{ MeV} \sim 430 \text{ MeV}$ の範囲での取り出しが可能な周波数変調型の可変エネルギー加速器である。

20

【0096】

実施例 2 の加速器の動作原理、その機器構成、その操作手順は、実施例 1 で述べたと同様であるため、詳細な説明は省略する。

【0097】

実施例 2 の加速器が実施例 1 の加速器 1 と異なるのは、軌道半径の大きさと磁場とエネルギーの関係、周回周波数とエネルギーの関係である。それらは、実施例 1 に示した加速器 1 から、ビームの磁気剛性率の比に軌道半径と磁場の積を比例させることで決定することができる。

30

【0098】

よって、実施例 2 の加速器においても、実施例 1 の加速器 1 と同様の構成および手法によって、実施例 1 と同様の作用効果を奏する。すなわち、実施例 2 の加速器は、周回ビームの運動量分散を抑制することができ、従来技術の運転方法に比べて、取り出し効率を向上でき、粒子線治療に用いた場合の照射時間を短縮できる。

【実施例 3】

【0099】

図 15 を用いて、実施例 3 を説明する。実施例 3 は、実施例 1 で述べた加速器 1、あるいは実施例 2 で述べた加速器を備える粒子線治療システム 1000 について説明する。図 15 は、粒子線治療システムの全体構成図である。

40

【0100】

図 15 に示すように、粒子線治療システム 1000 は、患部の体表からの深さによって照射する陽子線あるいは炭素線（以下ではまとめてビームと呼ぶ）のエネルギーを適切な値にして、患者に照射する装置である。

【0101】

粒子線治療システム 1000 は、加速器 1、ビーム輸送系 2、照射装置 3、治療台 4、全体制御装置 40、照射制御装置 50、治療計画データベース 60、治療計画装置 70 を備える。

【0102】

加速器 1 は、実施例 1 または実施例 2 で述べた。ビーム輸送系 2 は、加速器 1 で加速さ

50

れたビームを照射装置 3 へ輸送する機構である。照射装置 3 は、ビーム輸送系 2 によって輸送されたビームを、治療台 4 に固定された患者 5 内の標的に照射する装置である。全体制御装置 40 は、加速器 1、ビーム輸送系 2 および照射装置 3 を制御する。照射制御装置 50 は、標的に対するビーム照射を制御する。治療計画データベース 60 は、治療計画装置 70 により作成された治療計画を記憶する。治療計画装置 70 は、標的に対するビームの照射計画を作成する。

【0103】

粒子線治療システム 1000 では、照射する粒子線のエネルギーと線量が治療計画によって定められる。治療計画により定められた、粒子線のエネルギーと照射量を全体制御装置 40 から照射制御装置 50 に順次入力する。これにより、粒子線治療システム 1000 は、適切な照射量を照射した時点で次のエネルギーに移行し、再度粒子線を照射するという手順を実施する。

10

【0104】

このように構成される実施例 3 の粒子線治療システム 1000 によれば、実施例 1 の加速器 1 または実施例 2 の加速器の特性である、短時間で照射完了できる点を利用することができるため、照射時間の短いシステムを提供できる。

【0105】

粒子線治療システム 1000 のビーム輸送系 2 は、固定式の照射装置に代えて、回転ガントリを用いることもできる。回転ガントリは、照射装置 3 ごと患者 5 の周りを回転し、ビームを照射することができる。さらに、固定式の照射装置 3 を複数設けてもよい。さらに、ビーム輸送系 2 を設けずに、加速器 1 から照射装置 3 へビームを直接輸送する構造としてもよい。

20

【0106】

なお、本発明は、上述した実施形態に限定されない。当業者であれば、本発明の範囲内で、種々の追加や変更等を行うことができる。上述の実施形態において、添付図面に図示した構成例に限定されない。本発明の目的を達成する範囲内で、実施形態の構成や処理方法は適宜変更することが可能である。

【0107】

また、本発明の各構成要素は、任意に取捨選択することができ、取捨選択した構成を具備する発明も本発明に含まれる。さらに特許請求の範囲に記載された構成は、特許請求の範囲で明示している組合せ以外にも組み合わせることができる。

30

【符号の説明】

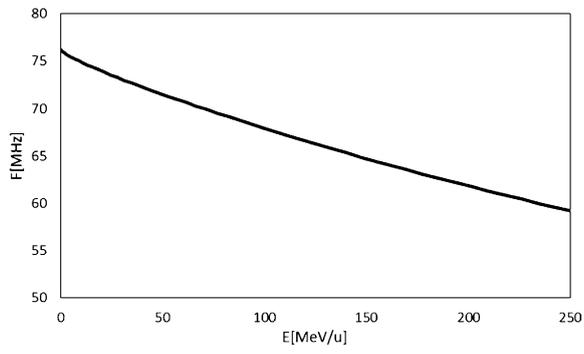
【0108】

- 1 ... 加速器
- 2 ... ビーム輸送系
- 3 ... 照射装置
 - 1 1 ... 電磁石
 - 1 2 ... イオン源
 - 1 3 ... コイル
- 2 0 ... ビーム通過領域
 - 2 1 ... 高周波加速空洞
- 3 3 ... トリムコイル
- 4 0 ... 全体制御装置
 - 4 1 ... モーター制御装置
 - 4 2 ... 低レベル高周波発生装置
 - 4 3 ... アンプ
 - 4 5 ... 電圧振幅計算装置
 - 4 6 ... 高周波電源
 - 4 7 ... 擾乱高周波制御装置
- 5 0 ... 照射制御装置

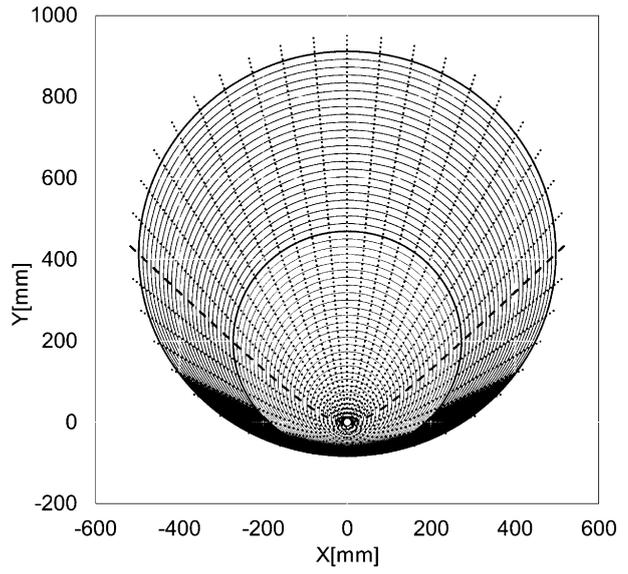
40

50

【 3 】

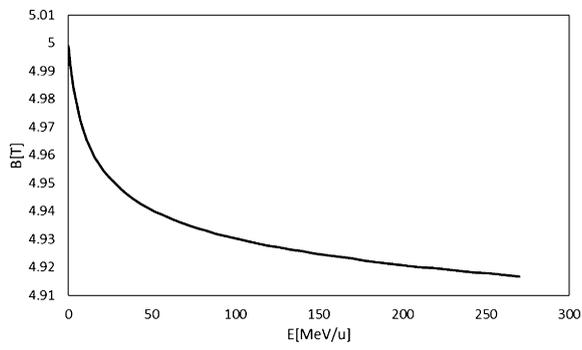


【 4 】

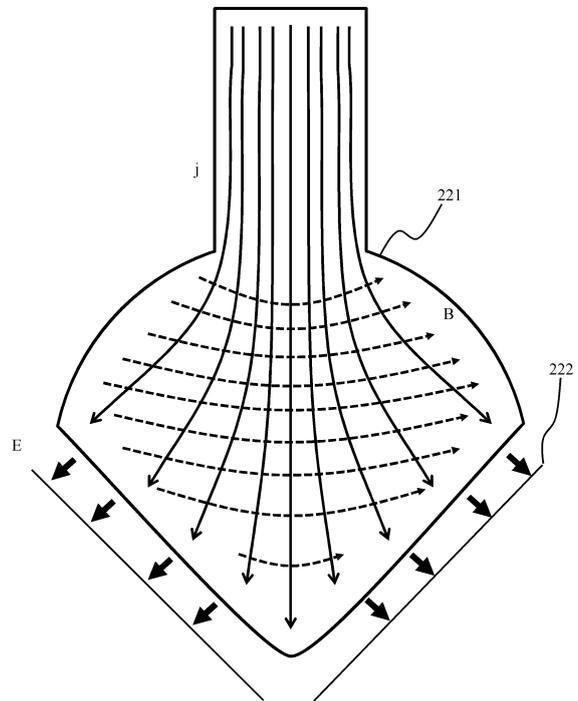


10

【 5 】



【 6 】



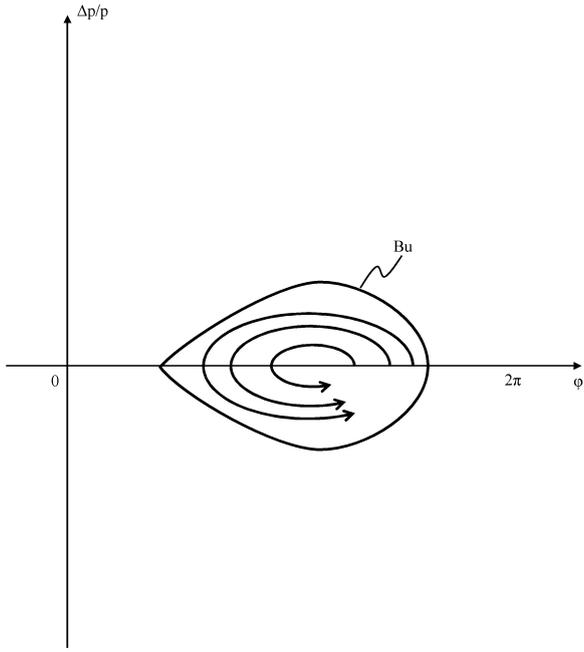
20

30

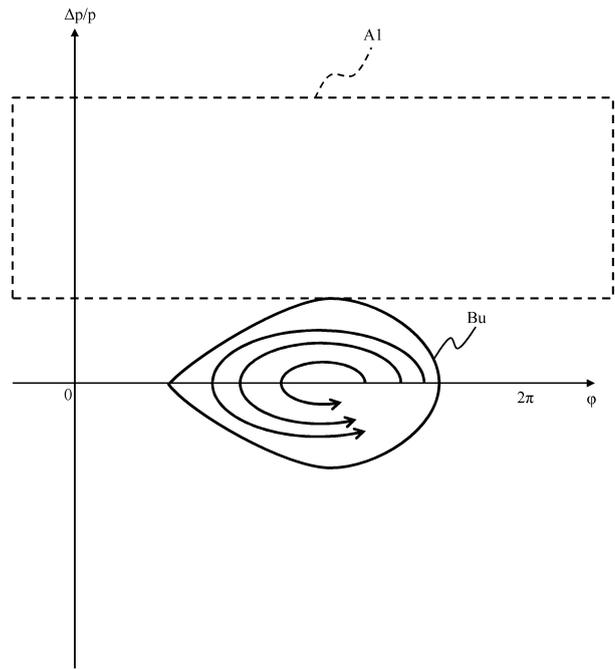
40

50

【 図 7 】



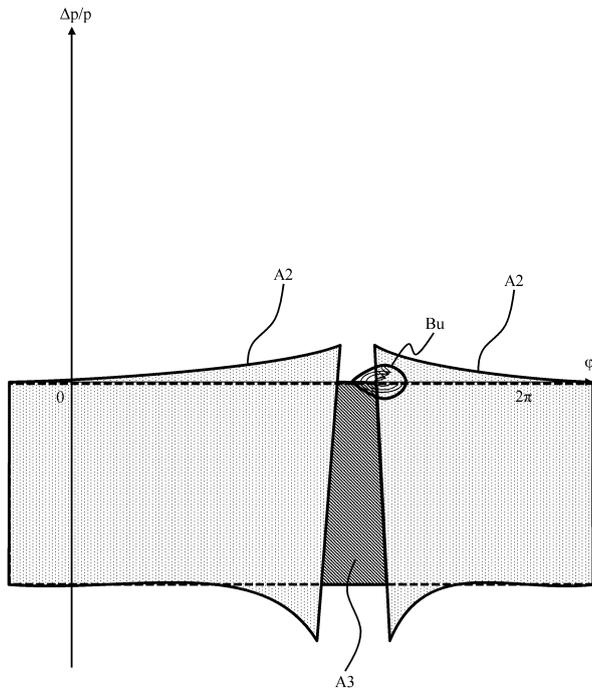
【 図 8 】



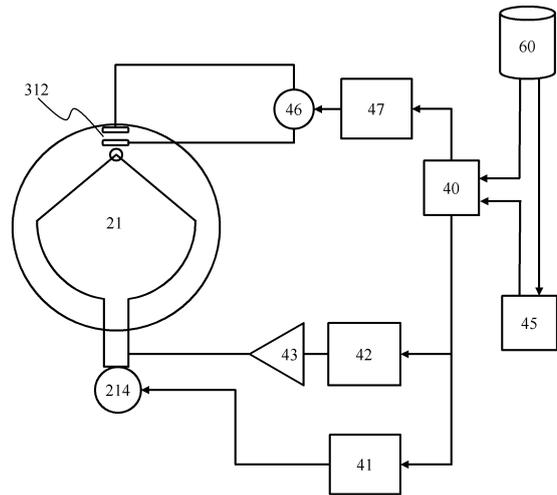
10

20

【 図 9 】



【 図 10 】

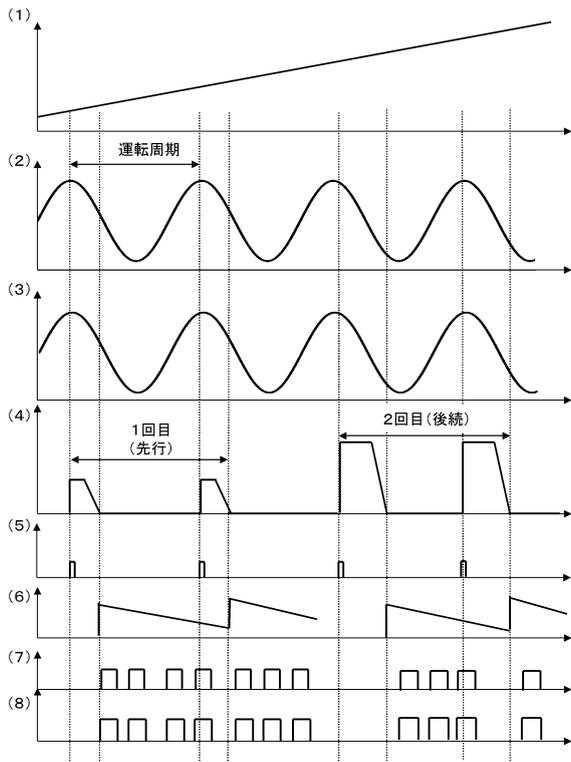


30

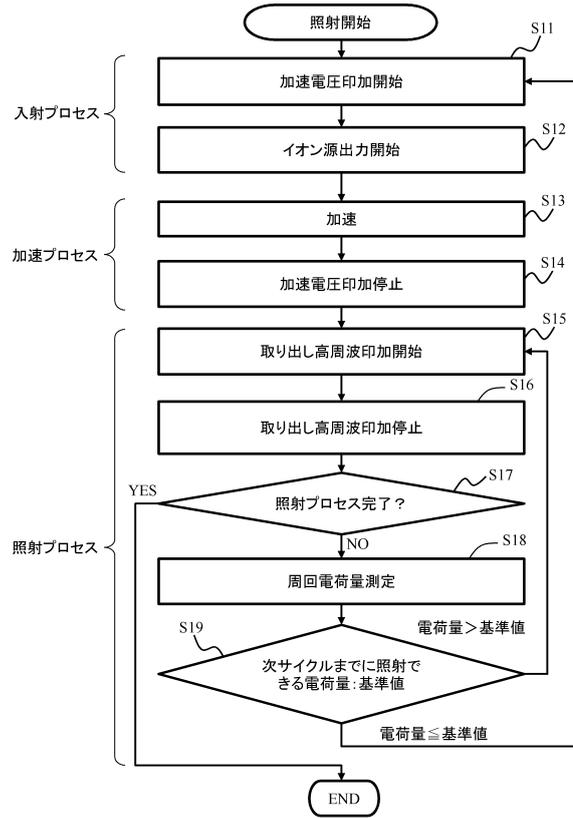
40

50

【図 1 1】



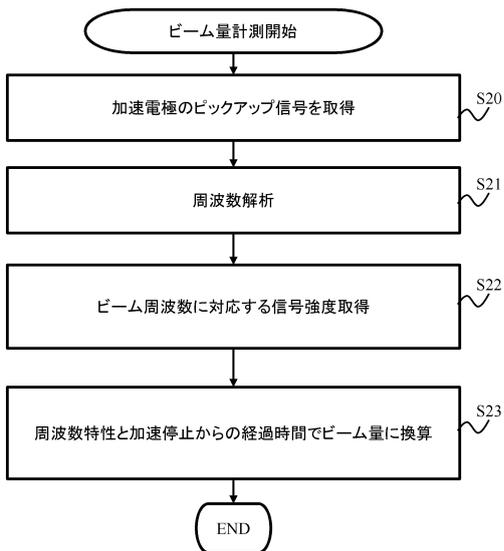
【図 1 2】



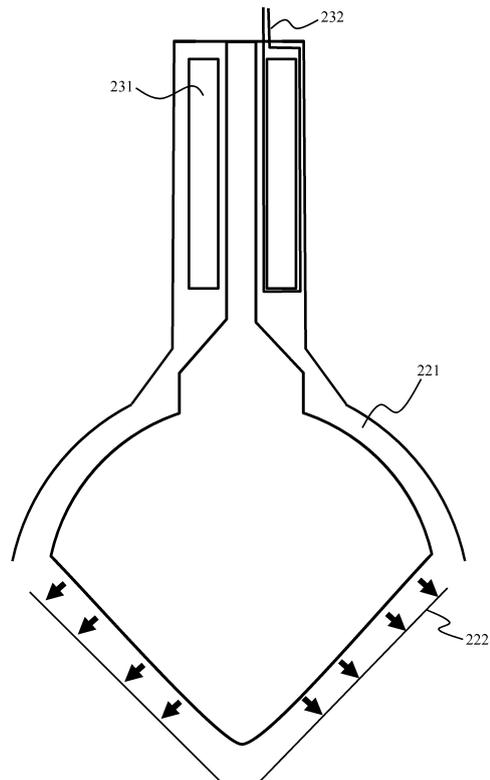
10

20

【図 1 3】



【図 1 4】

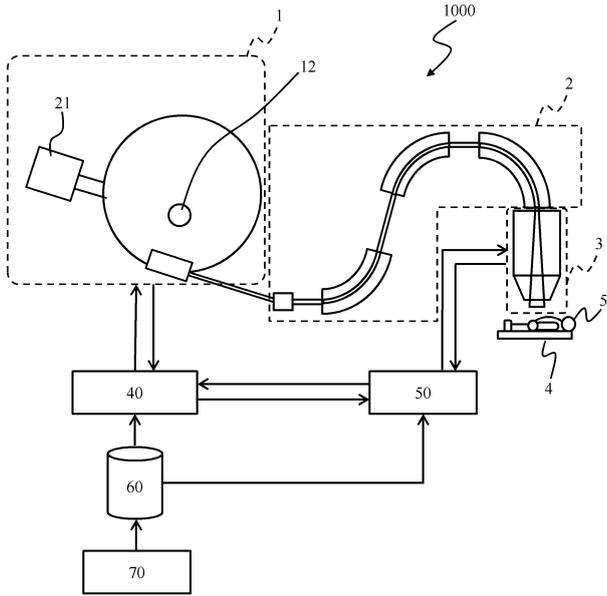


30

40

50

【 図 15 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 中島 裕人

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 BC15 CA06 CA16 CA17 CA22 EA07
4C082 AA01 AC05 AE01