

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7002952号  
(P7002952)

(45)発行日 令和4年1月20日(2022.1.20)

(24)登録日 令和4年1月5日(2022.1.5)

(51)国際特許分類

F I

H 0 5 H 13/00 (2006.01)

H 0 5 H 13/00

A 6 1 N 5/10 (2006.01)

A 6 1 N 5/10

H

請求項の数 20 (全19頁)

(21)出願番号	特願2018-12145(P2018-12145)	(73)特許権者	000005108
(22)出願日	平成30年1月29日(2018.1.29)		株式会社日立製作所
(65)公開番号	特開2019-133745(P2019-133745 A)	(74)代理人	100098660
(43)公開日	令和1年8月8日(2019.8.8)		弁理士 戸田 裕二
審査請求日	令和2年7月17日(2020.7.17)	(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
		(72)発明者	株式会社 日立製作所内
			関 孝義
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
		(72)発明者	株式会社 日立製作所内
			齋藤 一義
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
		(72)発明者	株式会社 日立製作所内
			野田 文章
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 円形加速器、円形加速器を備えた粒子線治療システム、及び円形加速器の運転方法

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

主磁場中で第1の高周波を印加することにより、軌道半径を増加させながら荷電粒子ビームを加速する円形加速器において、  
前記第1の高周波とは周波数の異なる第2の高周波を、前記円形加速器内部の前記荷電粒子ビームの軌道の集約領域、または前記荷電粒子ビームの最大エネルギー軌道上で印加することにより、前記荷電粒子ビームを出射することを特徴とする円形加速器。

## 【請求項2】

請求項1に記載の円形加速器において、  
前記円形加速器は、前記第2の高周波を印加する高圧電極と接地電極とを有し、  
前記高圧電極と前記接地電極とは、所望のエネルギーまで加速された前記荷電粒子ビームが通過する軌道をはさんで設置される  
ことを特徴とする円形加速器。

## 【請求項3】

請求項2に記載の円形加速器において、  
前記第2の高周波は、前記荷電粒子ビームの軌道面内かつ前記荷電粒子ビームの軌道と直交する方向である水平方向のベータトロン振動の振幅を増大させる周波数である  
ことを特徴とする円形加速器。

## 【請求項4】

請求項3に記載の円形加速器において、

前記第 2 の高周波は、水平方向の前記ベータトロン振動の振動数又は前記振動数の小数部のいずれか一方と、前記所望のエネルギーの前記荷電粒子ビームの周回周波数と、の積と略同一である第 1 の周波数成分を含むことを特徴とする円形加速器。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の円形加速器において、

前記第 2 の高周波は、前記第 1 の周波数成分とは異なる複数の第 2 の周波数成分を含むことを特徴とする円形加速器。

【請求項 6】

請求項 5 に記載の円形加速器において、

前記第 2 の周波数成分は、前記荷電粒子ビームのチューンの変動、及び / または、ばらつきを考慮した値である

ことを特徴とする円形加速器。

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 いずれかに記載の円形加速器において、

2 極以上の極数の磁場成分と、少なくとも 4 極磁場成分を含む多重極磁場が存在する磁場領域が、前記主磁場中に少なくとも 2 箇所ある

ことを特徴とする円形加速器。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の円形加速器において、

前記磁場領域に含まれる 4 極以上の極数の多重極磁場成分が、径方向外周側に向かって前記主磁場が強くなる磁場勾配を有する第 1 の磁場領域である

ことを特徴とする円形加速器。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の円形加速器において、

前記磁場領域に含まれる 4 極以上の極数の多重極磁場成分が、径方向外周側に向かって前記主磁場が弱くなる磁場勾配を有する第 2 の磁場領域である

ことを特徴とする円形加速器。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の円形加速器において、

前記第 1 および前記第 2 の磁場領域が、前記荷電粒子ビームが加速中に周回する軌道より外周側に存在する

ことを特徴とする円形加速器。

【請求項 11】

請求項 9 又は 10 いずれか一項に記載の円形加速器において、

前記荷電粒子ビームが所望のエネルギーまで加速されると、前記第 1 の高周波を遮断し、前記第 2 の高周波を立ちあげることを特徴とする円形加速器。

【請求項 12】

請求項 11 に記載の円形加速器において、

前記出射に用いる高周波の印加開始後にビームが前記第 1 の磁場領域または前記第 2 の磁場領域に達する前に、前記第 2 の高周波の電圧を低下させるか、又は遮断するように制御することを特徴とする円形加速器。

【請求項 13】

請求項 12 に記載の円形加速器において、

前記第 2 の高周波の印加時間を変える、又は、前記第 2 の高周波を遮断後に再度印加することを特徴とする円形加速器。

【請求項 14】

請求項 1 乃至 13 いずれかに記載の円形加速器において、

前記第 2 の高周波の周波数をスweepすることを特徴とする円形加速器。

【請求項 15】

10

20

30

40

50

請求項 1 乃至 1 4 に記載の円形加速器において、  
前記円形加速器は、  
前記主磁場を形成し、対向して配置される主磁極を含む主電磁石と、  
前記主磁極間に前記荷電粒子ビームを入射するイオン源と、  
前記主磁極間に配置され、前記第 1 の高周波が印加される加速間隙と、  
前記主磁場中から前記円形加速器の外部に前記荷電粒子ビームを出射する出射経路と、  
を備え、  
前記加速間隙は、前記第 1 の高周波を周波数変調することを特徴とする円形加速器。

【請求項 1 6】

請求項 1 乃至 1 4 いずれか一項に記載の円形加速器において、  
前記円形加速器は、  
前記主磁場を形成し、対向して配置される主磁極を含む主電磁石と、  
前記主磁極間に前記荷電粒子ビームを入射するイオン源と、  
前記主磁極間に配置され、前記第 1 の高周波が印加される加速間隙と、  
前記主磁場中から前記円形加速器の外部に前記荷電粒子ビームを出射する出射経路と、  
を備え、  
前記荷電粒子ビームの周回する軌道が、ある一方向に偏芯していることを特徴とする円形加速器。

【請求項 1 7】

請求項 1 乃至 1 6 に記載の円形加速器と、ビームを患者に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。

【請求項 1 8】

主磁場中で第 1 の高周波を印加することにより、軌道半径を増加させながら荷電粒子ビームを加速する円形加速器の運転方法であって、  
前記第 1 の高周波とは周波数の異なる第 2 の高周波を、前記円形加速器内部の前記荷電粒子ビームの軌道の集約領域、または前記荷電粒子ビームの最大エネルギー軌道上で印加することにより、前記荷電粒子ビームを出射することを特徴とする円形加速器の運転方法。

【請求項 1 9】

請求項 1 8 に記載の円形加速器の運転方法において、  
前記円形加速器は、前記第 2 の高周波を印加する高圧電極と接地電極とを有し、  
前記高圧電極と前記接地電極とは、所望のエネルギーまで加速された前記荷電粒子ビームが通過する軌道をはさんで設置される  
ことを特徴とする円形加速器の運転方法。

【請求項 2 0】

請求項 1 8 又は 1 9 いずれか一項に記載の円形加速器の運転方法において、  
前記第 2 の高周波は、前記荷電粒子ビームの軌道面内かつ前記荷電粒子ビームの軌道と直交する方向である水平方向のベータトロン振動の振幅を増大させる周波数である  
ことを特徴とする円形加速器の運転方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、粒子線の円形加速器と、それを利用した粒子線治療システム、円形加速器の運転方法に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

粒子線治療には、ビームを周回させて加速する円形加速器がよく用いられる。なかでも、超電導コイルを用いたシンクロサイクロトロンは治療施設の小型化、低コスト化に有効である。非特許文献 1 には、粒子線治療に用いられるシンクロサイクロトロンが開示されている。シンクロサイクロトロン中のビームは、時間的に一定の主磁場中で、軌道の曲率半径を増しながら周回し、周回途中に加速高周波電場が生じる加速間隙を通過する度にエネル

10

20

30

40

50

ギーを得て加速される。主磁場が非等時性磁場であるため、加速条件を維持するには、加速高周波電場の周波数を変調する必要がある、ある周波数変調パターンがm s e cオーダの加速周期で繰り返される。すなわち、入射されて加速されたビームは、最高エネルギーに達すると、加速器外へ出射される、という加速周期を繰り返している。

【0003】

特許文献1には、粒子線治療で一般的なスキャンング照射法が開示されている。出射されたビームは、照射装置を経て患者患部に照射される。このとき粒子線治療で一般的なスキャンング照射方式であれば、患部形状に合わせて、スキャンングコイルでビーム進行方向と垂直な方向にビームを走査する。また、ビーム進行方向には、ビームのエネルギーを変え飛程を調整することで患部形状に合わせて照射する。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特開平10-118204号公報

【非特許文献】

【0005】

【文献】W. Kleeven, "The IBA Superconducting Synchrocyclotron Project S2C2", Proceedings of Cyclotrons 2013

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

非特許文献1のシンクロサイクロトロンでは、加速器内に入射されたビームは最高エネルギーに達するまで加速されると、リジェネレータによって加速器の外に出射されるという、加速周期を繰り返す。すなわち、パルス状の時間構造をもったビームが1パルス入射され、パルス状のビームが1パルス加速器から出射されるという加速周期を繰り返す。出射されるビーム量は、入射されるパルス量と加速・出射の過程に依存し、出射されるビームパルスの長さや電荷量を任意に制御することは困難である。また、出射されるビーム電荷量は、イオン源におけるイオン生成量の時間変動や、加速高周波電場の時間的な安定性などに左右されるため、加速周期ごとにばらつくという課題もある。

30

【0007】

ここで、スキャンング照射では、患部への過少・過大照射を防ぐため、照射スポットごとに高精度な線量制御が求められる。しかし、シンクロサイクロトロンでスキャンング照射をする場合、前述のように、1加速周期のうちに1パルスのビーム電荷のみで、1スポット分の要求線量を過不足なく照射するのは困難である。イオン源を調整し入射ビーム電荷を抑制するか、加速高周波電圧を低下させるなどして出射ビーム電荷をあえて抑制し、低電荷のビームを複数パルス分出射することで1スポット分の線量を照射する方法も考えられる。しかし、この方法では、単位時間当たりの照射量である線量率が低下し、一回の治療に時間がかかってしまい、患者スループットが低下する。

【0008】

40

そこで、主磁場中での高周波を印加することにより、軌道半径を増加させながら荷電粒子ビームを加速する円形加速器において、荷電粒子ビームの円形加速器からの出射を高精度に制御し、線量率を向上させることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

主磁場中で高周波を印加することにより、軌道半径を増加させながら荷電粒子ビームを加速する円形加速器において、加速に用いる高周波とは周波数の異なる高周波を荷電粒子ビームに印加することにより、荷電粒子ビームを出射する。

【発明の効果】

【0010】

50

主磁場中での高周波を印加することにより、軌道半径を増加させながら荷電粒子ビームを加速する円形加速器に本発明を適用すれば、出射に用いる高周波により、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。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施例1の円形加速器の外観である。

【図2】実施例1の円形加速器の断面構造である。

【図3】図2のB - B' 矢視図である。

【図4】実施例1の高周波キッカの断面構造である。

【図5】図4のBより見た高周波キッカの鳥瞰図である。

10

【図6】図2および図10のA - A' 矢視図である。

【図7】図6の直線r上における主磁場分布図である。

【図8】実施例1の加速器運転パターンを示す図である。

【図9】実施例1の加速高周波電源、高周波キッカ電源および制御系のブロック図である。

【図10】実施例1の粒子線治療システムの全体構成を示す図である。

【図11】実施例2の円形加速器の断面構造である。

【図12】実施例2の円形加速器の各エネルギー別のビーム軌道を示す図である。

【図13】実施例2の高周波キッカの断面構造である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

20

以下、図面を用いて本発明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。

【0013】

また、本発明にかかる円形加速器は、出射するビーム量を細かく制御でき、粒子線治療システム、特にスキャンニング照射法を用いる粒子線治療システムに好適だが、粒子線治療システムへの適用に限定されるものではない。

【実施例1】

【0014】

本発明の好適な一実施例である実施例1の円形加速器を説明する。本実施例の円形加速器39は、時間的に一定強度の主磁場中を、周波数変調した高周波電場によって陽子のビームを加速するものである。その出射ビームのエネルギーは、例えば、235MeVである。

30

【0015】

図1に、円形加速器39の外観、図2に円形加速器39の横断面の構成図、図3に円形加速器39の縦断面の構成図（図2のB - B' 矢視図）を示す。

【0016】

円形加速器39は上下方向に分割可能な主電磁石40によってその外殻を形成し、主電磁石40内部のビーム加速領域は真空引きされている。

【0017】

主電磁石40の上部には主電磁石40に入射するためのイオンのビームを生成するイオン源53が設置されている。イオン源53で生成されたビームは、低エネルギービーム輸送系54を通り、上側の主磁極38の中心付近に設けられたイオン入射部52より主電磁石40内部のビーム加速領域に入射される。イオン源53としては、ECRイオン源などを適用できる。なお、イオン源53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型イオン源などが好適である。

40

【0018】

主電磁石40は、主磁極38（図6参照）、ヨーク41、主コイル42からなる。ヨーク41は、主電磁石40の外観を形成し、内部におよそ円筒状の領域を構成する。主コイル42は、円環状のコイルであり、ヨーク41の内壁に沿って設置される。主コイル42は超電導コイルであり、主コイル42周囲にはクライオスタット60を設置して冷却する。

50

主コイル 4 2 の内周側には主磁極 3 8 が上下対向して設置されている。主コイル 4 2 に電流を流すことにより励起され、主磁極 3 8 により形成される上下方向の磁場を、主磁場と呼ぶ。また、加速領域は、主磁場中のビームを加速するための領域いう。

【 0 0 1 9 】

ヨーク 4 1 には貫通口が複数ある。そのうち加速されたビームを出射するためのビーム用貫通口 4 6、ヨーク 4 1 内部の種々のコイル導体を外部に引き出すためのコイル用貫通口 4 8、真空引き用貫通口 4 9、高周波加速空洞 1 0 のための高周波系用貫通口 5 0 が上下磁極の接続面に設けられている。

【 0 0 2 0 】

高周波加速空洞 1 0 は、 $\pi/2$  共振型空洞であり、ディー電極 1 2、ダミーディー電極 1 3、内導体 1 4、外導体 1 5、回転コンデンサ 3 0 を有する。ディー電極 1 2 は、D 字型の中空電極であり、内導体 1 4 とつながっている。ダミーディー電極 1 3 は、アース電位の電極であり、内導体 1 4 を外包する外導体 1 5 とつながっている。ダミーディー電極 1 3 の形状は、D 字型の中空形状である必要はなく、ディー電極 1 2 との間に加速間隙 1 1 を形成する。

10

【 0 0 2 1 】

入力カプラ 2 0 は、高周波加速空洞 1 0 に高周波電力を供給するための機器であり、内導体 1 4 に対して静電結合式か磁気結合式により接続されている。加速高周波電源 2 5 より入力カプラ 2 0 に電力が供給され、入力カプラ 2 0 を通して外部より内導体 1 4 に対して高周波電力が供給される。これにより、ディー電極 1 2 とダミーディー電極 1 3 との間の加速間隙 1 1 にビームを加速するための高周波加速電圧、高周波加速電圧による高周波電場が発生する。

20

【 0 0 2 2 】

回転コンデンサ 3 0 は、高周波加速空洞 1 0 の共振周波数を変調するための機器であり、モータ 3 1、固定電極 3 2、固定電極 3 2 と対向する回転電極 3 3 とを含む。固定電極 3 2 は、内導体 1 4 上に形成されている。また、回転電極 3 3 は、外導体 1 5 に隣り合い、外導体 1 5 と物理的に接続されていないものの、外導体 1 5 と静電容量を介して電氣的に接続されている。なお、固定電極 3 2 を外導体 1 5 上に形成し、回転電極 3 3 が内導体 1 4 に静電結合される構成でもよい。

【 0 0 2 3 】

30

回転コンデンサ 3 0 は、回転電極 3 3 をモータ 3 1 で回転させることで、固定電極 3 2 と回転電極 3 3 との対向部面積を変化させ、固定電極 3 2 との間に形成される静電容量を時間的に変動させる。静電容量を時間的に変動させることで、高周波加速空洞 1 0 の共振周波数を変え、周波数変調パターンを形成する。回転コンデンサ 3 0 によって周波数変調された加速電圧が、ディー電極 1 2 とダミーディー電極 1 3 との間の加速間隙 1 1 に発生する。図 2 に示した加速間隙 1 1 は、ハーモニクス数 1 の場合、すなわち周回周波数と加速周波数とが同じ場合を示しており、ビームの軌道形状に応じて形成される。

【 0 0 2 4 】

円形加速器 3 9 は、ビームを出射するための機器として、高周波キッカ 7 0、セプタムコイル 4 3、高エネルギービーム輸送系 4 7 とを有する。加速されたビームは、ビーム出射経路入口 8 2 から、加速領域の外に出射される。セプタムコイル 4 3 は、このビーム出射経路入口 8 2 に配置される。なお、セプタムコイル 4 3 は、ビーム進行方向に 2 つ以上に分割して配置してもよい。主電磁石 4 0 の内部から外部へ出射ビームを輸送するための高エネルギービーム輸送系 4 7 が、セプタムコイル 4 3 に続き、ビーム用貫通口 4 6 を通って、主電磁石 4 0 の外部にかけて配置されている。高周波キッカ 7 0 は、自身の内部を通過する周回ビームに高周波電圧を印加する機器である。セプタムコイル 4 3 は、ビームを水平方向外周側に偏向するためのコイルであり、コイル導体 4 3 - 1 とコイル導体 4 3 - 2 とを有する。セプタムコイル 4 3 は、加速領域とコイル導体 4 3 - 1 を隔てて接している。コイル導体 4 3 - 1、4 3 - 2 に電流を流すことにより、セプタムコイル 4 3 内部には、ビームの周回軌道に対して鉛直方向の磁場が発生する。この磁場により、セプタムコ

40

50

イル 4 3 内部に進行したビームは偏向され、高エネルギービーム輸送系 4 7 へと進んでいく。なお、セプタムコイル 4 3 は、鉄心などの磁性体コアを備えるものであってもよい。また、セプタムコイル 4 3 は、内部に入ったビームを高エネルギービーム輸送系 4 7 の方向に偏向できるのであれば、コイルを用いずに磁性体や永久磁石のみを用いたパッシブな構成で代替することもできる。

【 0 0 2 5 】

また、主電磁石 4 0 の内部には、2 極磁場や多重極磁場からなる擾乱磁場であるピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とが形成される。ビーム出射には、高周波キッカ 7 0、ピーラ磁場領域 4 4、リジェネレータ磁場領域 4 5、セプタムコイル 4 3、および高エネルギービーム輸送系 4 7 を用いる。ビームの出射の詳細については、後述する。

10

【 0 0 2 6 】

ここで、円形加速器 3 9 でビームが入射されてから出射するまでのビームの動きについて簡単に説明する。

【 0 0 2 7 】

まず、イオン源 5 3 で生成された荷電粒子のビームは、低エネルギービーム輸送系 5 4 を通り、イオン入射部 5 2 より主電磁石 4 0 内部のビーム加速領域に入射される。入射されたビームは、高周波電場で加速され、エネルギーを増しながら主磁場中を周回する。ビームは加速されるにつれ、その軌道の曲率半径を増し、ビームは加速領域の中心から外側に向かって、螺旋状の軌道を描く。

【 0 0 2 8 】

20

ここで、ビーム加速領域内において、ビームが加速開始されて最大エネルギー（例えば、2 3 5 M e V）になるまでに通る軌道を周回軌道と呼ぶ。周回軌道のうち、最大エネルギーのビームが通過する軌道を最大エネルギー軌道 8 0 と呼ぶ。また、周回軌道が螺旋を描く面を軌道面または軌道平面という。また、加速領域の中心を原点とする軌道面の 2 次元極座標系としたときの中心からの半径外側方向の軸を r 軸とする。

【 0 0 2 9 】

この周回の際に、ビームの荷電粒子は、ビームの軌道と直交する方向に振動しており、この振動をベータトロン振動、この振動の振動数をベータトロン振動数という。また、周回一周あたりの振動数をチューンといい、周回一周あたりの軌道面外側へのビームの r 軸上変位をターンセパレーションという。また、周回するビームは、軌道面内かつビームの軌道と直交する方向のベータトロン振動を水平方向のベータトロン振動、チューンを水平方向チューンという。このベータトロン振動は、適切な高周波電圧を印加すると、共鳴が起こり振幅が急激に増大する性質がある。

30

【 0 0 3 0 】

主磁場は、周方向に主磁場強度を一定とするタイプのほか、A V F ( A z i m u t h a l V a r y i n g F i e l d ) タイプでもよいが、いずれの場合も主磁場分布は非等時性磁場であるから、式 ( 1 ) で表される n 値が 0 より大きく、かつ 1 未満となるビーム安定化条件を満たす。

【 0 0 3 1 】

【数 1】

40

$$n = - \frac{\rho}{|B|} \frac{\partial B}{\partial r} \quad \text{【式 1】}$$

【 0 0 3 2 】

ここで、 $\rho$  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である。上述のビーム安定化条件のもとでは、設計軌道から径方向に微小にずれたビームは設計軌道に戻すような復元力を受けると同時に、軌道面に対し鉛直な方向にずれたビームも軌道面に戻す方向に主磁場から復元力を受ける。すなわち、ビームは設計軌道の近傍をベータトロン振動し、ビームを安定に周回・加速できる。また、全エネルギーのビームで、軌

50

道面内に平行、かつ軌道と直交する方向のベータトロン振動数（水平方向チューン） $r$ は 1 に近い値に設定される。

【 0 0 3 3 】

上述の主磁場分布は、主磁極 3 8、および主磁極 3 8 の表面に設置するトリムコイル（図示せず）や磁極片（図示せず）によって形成する。これら主磁場分布を形成する構成要素は、軌道平面に対し対称に配置するため、主磁場は軌道平面上においては、軌道平面と垂直な方向の磁場成分のみを持つ。

【 0 0 3 4 】

この主磁場中でビームが最大エネルギーまで加速されると、加速間隙 1 1 にビームを加速するための高周波加速電圧が停止され、ビームは、最大エネルギー軌道 8 0 上を周回する。そして、最大エネルギー軌道 8 0 上に設置され、高周波を印加する高周波キッカ 7 0 にビームが入ると、高周波電圧が印加され、ビームのベータトロン振動振幅が増大する。

【 0 0 3 5 】

ベータトロン振動振幅が増大したビームは、やがて、最大エネルギー軌道 8 0 の外周側に、最大エネルギー軌道 8 0 からある距離を置いて設置されたピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とに到達する。ピーラ磁場領域 4 4 に到達したビームは、軌道面の外周側にキックされ、リジェネレータ磁場領域 4 5 に到達したビームは、軌道面内周側にキックされる。ここで、キックするとは、電場または磁場をかけることにより、ビームを偏向させることをいう。ピーラ磁場領域 4 4 の四極磁場成分によるキックで、ビームは、さらにベータトロン振動振幅を増大させ、ターンセパレーションは増大していく。同時に、リジェネレータ磁場領域 4 5 の磁場により、ビームの水平方向チューンが急激に変動しないようにしておき、ビームが出射されるまでの間に、水平方向と 9 0 度直交する垂直方向にベータトロン振動が発散してビームが失われるのを防ぐ。十分なターンセパレーションが得られると、セプタムコイル 4 3 にビームが入り、軌道面外側にキックされ、高エネルギービーム輸送系 4 7 を通り、円形加速器 3 9 の外側に出射される。

【 0 0 3 6 】

ターンセパレーションの増大幅は、高周波キッカ 7 0 によるものより、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とによるもののほうがはるかに大きい。そのため、高周波キッカ 7 0 により印加する高周波電圧を調整することで、最大エネルギー軌道 8 0 上を周回するビームのうち、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とに到達するビームの量を調整することができる。すなわち、従来の円形加速器では、ビームは最大エネルギーに達したのち、出射電荷量の制御がなされることなく全て出射されていた。対して、高周波キッカ 7 0 への高周波印加をビーム出射途中で停止することで、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、円形加速器 3 9 からのビーム出射を中断できるようになる。高周波キッカ 7 0 に印加を再開することでビームの出射の再開もできる。また、高周波キッカ 7 0 に印加する電圧の強さや高周波の振幅、位相、周波数のいずれかを制御することで、円形加速器 3 9 から出射するビームの強さを制御することができる。さらに、従来の円形加速器では、イオン源におけるイオン生成量の時間変動や、加速高周波電場の時間的な安定性などにより、出射するビーム電荷量がパルスごとにばらついていて、本技術では、高周波キッカ 7 0 に印加する電圧を調整することで、これらのビームの安定性に影響する要因を吸収し、出射ビームの電荷量を高精度に制御できる。

【 0 0 3 7 】

図 4 に、高周波キッカ 7 0 の断面構成を示す。また、図 5 に、図 4 中 C の方向より高周波キッカ 7 0 を見た鳥瞰図を示す。高周波キッカ 7 0 は、接地電極 7 1 と高圧電極 7 2 からなる。両電極は、最大エネルギー軌道 8 0 を挟むように、内周側に接地電極 7 1、外周側に高圧電極 7 2 が対向して設置される。かつ、接地電極 7 1 と高圧電極 7 2 とは、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、すなわち、接地電極 7 1 と高圧電極 7 2 とが、最大エネルギー軌道 8 0 のカーブにおおよそ平行な形状、に定める。接地電極 7 1 には金属製の突起部 7 3 を取り付け、接地電極 7 1 と高圧電極 7 2 との間に

10

20

30

40

50



生じる高周波電場の集中を高めることもできる。高周波電圧が印加される高圧電極 7 2 は絶縁支持される。円筒状の加速領域の中で、ビームは該円筒の高さ方向真ん中付近に軌道平面を描く。接地電極 7 1、高圧電極 7 2 共にビームが通過する軌道平面付近に通過孔を有する。この通過孔は、ビームのベータatron振動による拡がりを考慮して、ビーム衝突が起きない程度の広さがよい。本実施例の高周波キッカ 7 0 は、図 5 に示すように端面が開いた形状であるが、ビーム通過孔を除いて端面を接地電極で閉塞し、共振器構造とすることもできる。高周波キッカ 7 0 は、最大エネルギー軌道 8 0 上に配置するのであればどこでもよいが、例えば図 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。

#### 【 0 0 3 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、ビームに作用する多重極磁場が存在する領域である。この多重極磁場には少なくとも 4 極磁場成分が含まれ、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。ピーラ磁場領域 4 4 では、径方向外周側に向かって主磁場を弱める方向の磁場勾配となっており、リジェネレータ磁場領域 4 5 では逆に径方向外周側に向かって主磁場を強める方向の磁場勾配とする。なお、ピーラ磁場領域 4 4 としては、磁極端部の主磁場が減少する領域を利用することもできる。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される。また、高周波キッカ 7 0 によりベータatron振動振幅が増大される前にピーラ磁場領域 4 4 またはリジェネレータ磁場領域 4 5 にビームが進行しないよう、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、最大エネルギー軌道 8 0 からベータatron振動の共鳴前の振幅分よりも大きい幅を空けて外周側に配置されることが望ましい。また、ビーム進行方向に対して上流側にピーラ磁場領域 4 4、下流側にリジェネレータ磁場領域 4 5 が配置されることが望ましいが、その逆でもよい。なお、図 2 では、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とを 1 つずつ設けているが、それぞれ、主磁場中に複数箇所に設けてもよい。

#### 【 0 0 3 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 の近辺には、磁性体製の複数の磁極片かコイル、あるいはその両者が非磁性材にて固定配置され、所望の多重極磁場を形成する。たとえば、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 のそれぞれについて、複数の磁極片で多重極磁場を、コイルで 2 極磁場を形成する。複数の磁極片とコイルは、近接配置させることも、空間的に離れた場所に配置することもできる。

#### 【 0 0 4 0 】

図 6 に、図 1 の A - A' 矢視図であるリジェネレータ磁場領域 4 5 の磁極片配置例を示す。磁極片としては、リジェネレータ磁場領域 4 5 に磁場勾配を発生させる磁場勾配用シム 3 6 と、磁場勾配用シム 3 6 が最大エネルギー軌道 8 0 の内周側に発生させる不要磁場を打ち消すための磁場補正用シム 3 7 と、を用いる。また、図 6 はリジェネレータ磁場領域 4 5 を例に説明したが、ピーラ磁場領域 4 4 についても、ピーラ磁場領域 4 4 も磁場勾配を発生させる磁場勾配用シム 3 6 と、磁場勾配用シム 3 6 が最大エネルギー軌道 8 0 の内周側に発生させる不要磁場を打ち消すための磁場補正用シム 3 7 と、を用いる。

#### 【 0 0 4 1 】

図 7 は、図 6 中 r 軸上の主磁場の分布を示す。最大エネルギー軌道 8 0 までは、磁場勾配  $B/r$  がわずかに下がっており、式 ( 1 ) の n 値が安定化条件を満たし、ビームが安定に周回する。しかし、リジェネレータ磁場領域 4 5 では、磁場勾配が急激に上昇しており、ビームが安定せず、軌道面内周側にキックされる。また、ピーラ磁場領域 4 4 では、リジェネレータ磁場領域 4 5 とは逆に、磁場勾配が急激に下降しており、ピーラ磁場領域 4 4 でも、ビームは安定せず、軌道面外周側にキックされる。

#### 【 0 0 4 2 】

なお、高周波キッカ 7 0 によるベータatron振動振幅の増大幅は、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とによるベータatron振動振幅の増大幅よりも小さいが、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とを設けなくても、高周波キッカ 7 0 によるベータatron振動振幅の増大効果により、ビームの出射は可能である。

## 【 0 0 4 3 】

図 8 は、ビームの出射手順について説明する図である。図 8 ( a ) は、高周波加速空洞 1 0 の共振周波数  $f_{cav}$  と高周波キッカ 7 0 によりビームに印加される高周波電場の周波数である高周波キッカ周波数  $f_{ext}$  と、時刻  $T$  との関係を表すグラフである。図 8 ( b ) は、加速間隙 1 1 に発生する加速電圧  $V_{acc}$  と高周波キッカ 7 0 に印加される高周波キッカ電圧  $V_{ext}$  と、時刻  $T$  との関係を表すグラフである。図 8 ( c ) は、入射するビームの電流と出射するビームの電流と、時刻  $T$  との関係を表すグラフである。

## 【 0 0 4 4 】

一加速周期は、加速電圧  $V_{acc}$  の立ち上がり (時刻  $T_1$ ) から始まる。その後、加速電圧  $V_{acc}$  が十分に上がると、イオン源 5 3 よりビームが入射される (時刻  $T_2$ )。ビームが入射してから時間  $t_1$  経過後にビームの高周波捕獲が終了する。捕獲されたビーム、すなわち入射されたビームのうち加速の準備が整ったビームが加速電圧  $V_{acc}$  により加速され始める (時刻  $T_3$ )。ビームが最大エネルギーである 2 3 5 M e V に達すると、加速高周波の遮断が開始され (時刻  $T_4$ )、それから時間  $t_2$  が経過すると加速高周波電圧  $V_{acc}$  が OFF 状態となる。それと同時に、高周波キッカ 7 0 へ高周波電圧  $V_{ext}$  の印加が開始される (時刻  $T_5$ )。なお、高周波キッカ 7 0 へ高周波電圧  $V_{ext}$  の印加開始 (時刻  $T_5$ ) は、加速高周波電圧  $V_{acc}$  が OFF 状態となるのと厳密に同時でなくてもよい。高周波電圧  $V_{ext}$  の印加開始は、加速高周波の遮断開始 (時刻  $T_4$ ) の直前や同時、直後でもよく、加速高周波電圧  $V_{acc}$  が OFF 状態の直前や直後でもよい。

## 【 0 0 4 5 】

高周波キッカ 7 0 の高周波電圧は、高周波キッカ 7 0 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、数  $\mu s$  の応答で素早く立ち上がる。ここで、ベータトロン振動は、チューン又はチューンの小数部のいずれか一方とビームの周回周波数との積が、印加される高周波電圧の周波数と略同一であるとき、振幅が共鳴的に増大する性質をもつ。そこで、該高周波電圧の周波数  $f_{ext}$  は、最大エネルギービームの水平方向チューン  $r$  の小数部  $r$  と、最大エネルギービームの周回周波数  $f_{rev}$  との積  $r \times f_{rev}$  と略同一となるようにしておく。その結果、水平方向ベータトロン振動の振幅は共鳴的に増大し続け、やがてピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 にビームが到達する (時刻  $T_6$ )。なお、周波電圧の周波数  $f_{ext}$  が、最大エネルギービームの水平方向チューン  $r$  と、最大エネルギービームの周回周波数  $f_{rev}$  との積  $r \times f_{rev}$  と等しくなるようにしてもよい。

## 【 0 0 4 6 】

ビームは、ピーラ磁場領域 4 4 を通過すると外周側にキックされ、リジェネレータ磁場領域 4 5 を通過すると逆に内周側にキックされる。ピーラ磁場領域 4 4、リジェネレータ磁場領域 4 5 共に径方向に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、 $2r=2$  のベータトロン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増大させることができる。

## 【 0 0 4 7 】

ビーム出射経路入口 8 2 にはセプタムコイル 4 3 が設置されている。やがてセプタムコイル 4 3 の内周側に設置されるコイル導体 4 3 - 1 の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、セプタムコイル 4 3 内部へと導かれ、十分な偏向を受け高エネルギービーム輸送系 4 7 へ導かれ、出射される。

## 【 0 0 4 8 】

なお、高周波キッカ 7 0 へ高周波電圧印加を開始した直後 (時刻  $T_5$ ) は、可能な限り大きな高周波電圧を印加し、ビームの振幅を素早く増大させることで、ビーム出射までの時間を短縮できる。そして、ビームがピーラ磁場領域 4 4 またはリジェネレータ磁場領域 4 5 に到達する直前 (時刻  $T_6$ ) に高周波電圧を低下させ、ピーラ磁場領域 4 4 とリジェネレータ磁場領域 4 5 とに進行するビームの量を調整することで、ビーム出射電流を細かく制御することができる。高周波電圧  $V_{ext}$  を低下させるかわりに、高周波キッカ 7 0

に印加する高周波の周波数をスweepする、あるいは該高周波の位相を変えることでも、ビームの出射電流を変えることができる。これは、ビームに含まれる荷電粒子のベータトロトン振動数が、ある分布をもってばらついているという性質（チューンスプレッド）を利用している。高周波の周波数を変えることにより、共鳴を起こす荷電粒子の振動数の分布のどの帯域に合わせるかで、ビームの出射電流を変えることができる。また、高周波電圧  $V_{acc}$  を低下させるかわりに、遮断してもよい。

【0049】

そして、ビームの出射開始（時刻  $T_6$ ）から時間  $t_4$  経過後に高周波キッカ70へ高周波電圧  $V_{ext}$  の印加を停止することで、ビームの出射を停止させる（時刻  $T_7$ ）。この時間  $t_4$  を調整することでビームの出射時間を制御することができる。

10

【0050】

高周波キッカ70に引加する高周波電圧を制御することで、ビーム出射電流を調整することができ、該高周波電圧を印加停止すればビーム出射を停めることができるので、スキャン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。例えば、図8に示すようにビームの出射開始（時刻  $T_6$ ）から時間  $t_4$  経過後まで高周波キッカ70への高周波電圧  $V_{ext}$  の印加を続ければ、時刻  $T_7$  までビームを出射することができる。

【0051】

また、出射後に加速器内に周回するビームが残存していれば、該高周波電圧  $V_{ext}$  を再び印加することでビーム出射を再開でき（時刻  $T_8$ ）、再びビームを入射・捕獲・加速することなしに次のスポット照射に用いることができる。すなわち、一加速周期内に複数回ビームを出射することができるので、イオン源53より入射された電荷を無駄なく使用できるため、線量率がさらに向上する。そして、再び、加速電圧  $V_{acc}$  が立ち上がり始めれば、新たな加速周期が始まる（時刻  $T_{10}$ ）。

20

【0052】

図9に、以上の出射方法を実現する高周波電源と制御系のブロック図を示す。加速高周波電源25は、カソード抵抗22、プレート電源23、三極管24を有する。高周波キッカ電源86は、プレート電源26、三極管24、グリッドバイアス電源89、前段増幅器94を有する。図9は加速高周波電源25、高周波キッカ電源86共に三極管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てもよい。

30

【0053】

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9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。

【0054】

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。ここで、原発振器92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。該信号はスイッチ93を経て前段増幅器94にて増幅されたのち、三極管24で増幅され、高周波キッカ70に供給される。高周波キッカ70の高周波電圧は、前段増幅器94の利得を変えるか、あるいはプレート電源26の出力電圧を高速に変調することで制御する。

40

【0055】

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ピックアップ信号から検出する加速高周波の周波数変調パターンと、各照射スポットへの要求線量をもとに、加速高周波のON/OFFタイミングと電圧振幅、それと高周波キッカ70のON/OFFタイミングと電圧振幅を制御する。

【0056】

50

また、加速器内部に残存する周回電荷量をモニタするために、最大エネルギー軌道 80 上のどこかに、静電的あるいは磁氣的にビーム電荷量を検出するビームモニタが設置される。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・取出しの加速周期を繰り返す。

#### 【0057】

図 10 に、粒子線治療システムの全体構成を示す。図 10 において、粒子線治療システムは、円形加速器 39、回転ガントリ 190、スキャニングコイルを含む照射装置 192、治療台 201 およびそれらを制御する制御装置 191 からなる。円形加速器 39 から出射されたビームは、回転ガントリ 190 により照射装置 192 まで輸送される。輸送されたイオンビームは照射装置 192、およびビームエネルギーの調整により患部形状に合致するよう整形され、治療台 201 に横たわる患者 200 の患部標的に対して所定量照射される。照射装置 192 は、線量モニタを内包しており、患者 200 への照射スポット毎に照射された線量を監視している。この線量データを元に、制御装置 191 は各照射スポットへの要求線量を計算して、図 9 の演算装置 91 への入力データとする。

10

#### 【0058】

以上が実施例 1 の説明である。本実施例により、高周波キッカ 70 での高周波印加を途中で停止することで、ピーラ磁場領域 44 とリジェネレータ磁場領域 45 とにビームが到達しなくなり、ビームの円形加速器 39 から出射の中断ができるようになる。高周波キッカ 70 に印加を再開することで、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。また、高周波キッカ 70 に印加する電圧の強さや高周波の振幅、位相、周波数のいずれかを制御することで、円形加速器 39 から出射するビームの強さを制御することができる。さらに、高周波キッカ 70 に印加する電圧を調整することで、ビームの安定性に影響する要因を吸収し、安定したビームを出射することができる。すなわち、出射に用いる高周波により、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、スキャニングに適した線量制御が可能となる。そのため、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。

20

#### 【実施例 2】

#### 【0059】

実施例 2 の円形加速器について説明する。本実施例のうち、実施例 1 と同じ構成については説明を省略し、異なる構成についてのみ説明する。

30

#### 【0060】

本実施例では、ビームエネルギーを 70 MeV から 235 MeV の間で任意に変えて加速器より出射できるようにするため、ビーム軌道をビーム出射経路入口 82 の側に偏芯させるように主磁場を形成した偏芯軌道型加速器を用いる。

#### 【0061】

図 11 に、偏芯軌道型加速器の断面構成を示す。図 2 からの構造上の変更点として、ディー電極 12、ダミーディー電極 13 の形状、及びその間に形成される加速間隙 11 の形状が挙げられる。ここで、回転コンデンサ 30 の回転軸と加速領域の円の中心を通る線を中心線とする。イオン入射部 52 は中心線上で加速領域の中心よりもビーム出射経路入口 82 側に配置されている。また、図示はしないが、後述する磁場を形成するために主磁極 38 の上下対向する面の形状も実施例 1 と大きく異なる。高周波キッカ 70 の構成も図 13 に示すように異なる。

40

#### 【0062】

図 12 に、各エネルギーの軌道を示し、偏芯軌道の実現方法を説明する。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 / 20 ごとにプロットしている。ディー電極 12 と対向するダミーディー電極 13 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される。より具体的には、ディー電極 12 は同心軌道の中心付近を先端とし、半径が等周回位相線に沿う、扇形のような中空の形状をしている。また、ダミーディー

50

電極 13 は、ディー電極 12 に対向する形状をしている。

【0063】

ビームのエネルギーが低い領域では、サイクロトロン同様にイオンの入射部 52 付近を中心とする同心軌道に近くなるが、より大きなエネルギーの軌道はビーム出射経路入口 82 の付近で密に集約しており、逆に内導体 14 の付近では各エネルギーの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。このような軌道配置とし、集約領域付近からビームを取出すことで、必要となるビームキック量を小さくするため、エネルギー可変のビーム出射を容易にすることができる。

【0064】

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、本実施例の加速器では、径方向外周側に行くにつれ主磁場が小さくなる分布を、主磁極 38 の形状と、その表面に設置するトリムコイルや磁極片により形成する。また、設計軌道に沿った線上では主磁場は一定値である。よって、設計軌道は円形となる。

【0065】

次にビームの出射方法について説明する。ビームの出射には、すべての出射エネルギーのビーム軌道が集約している集約領域付近に設置する高周波キッカ 70 と、その両脇に配置するピーラ磁場領域 44、リジェネレータ磁場領域 45、そしてセプタムコイル 43 と高エネルギービーム輸送系 47 を用いる。本実施例では、出射に用いる上記要素のうち、高周波キッカ 70 の構成が実施例 1 と異なる。

【0066】

図 13 に、本実施例の高周波キッカ 70 の断面構成を示す。高周波キッカ 70 は、実施例 1 と同じく接地電極 71 と突起部 73、高圧電極 72 で構成されるが、接地電極 71 と高圧電極 72 は、最大エネルギー軌道 80 と最低出射エネルギー軌道 81 とが挟まれるように配置される。かつ、それぞれの軌道と軌道面内で直交する方向と近い向きに高周波電場が作用するように、接地電極 71 と高圧電極 72 との形状が定められる。すなわち接地電極 71 と高圧電極 72 が、最低出射エネルギー軌道 81 と最大エネルギー軌道 80 とのカーブに沿っておおよそ平行に並ぶ形状となる。ここで、最低出射エネルギー軌道 81 とは、円形加速器 39 から出射できる最低エネルギー（例えば、70 MeV）のビームが通過する軌道である。なお、突起部 73 は省略してもよい。

【0067】

ビームの出射手順は、基本的に実施例 1 で説明したものと同一であるが、加速高周波電圧  $V_{acc}$  を遮断するタイミング（時刻  $T_4$ ）と高周波キッカ 70 へ高周波電圧  $V_{ext}$  の印加開始のタイミング（時刻  $T_5$ ）とを前にずらせば、任意のエネルギーのビームが出射できるようになる。言い換えると、加速したビームが所望のエネルギーに達したタイミングで、加速高周波電圧  $V_{acc}$  の遮断を開始する（時刻  $T_4$ ）ことで、ビームの加速が中断される。そして、高周波電圧  $V_{ext}$  を印加開始することで（時刻  $T_5$ ）、その所望のエネルギーのビームのベータatron振動の振幅が高周波キッカ 70 により増大される。やがて、その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 とに到達し、出射される。

【0068】

また、セプタムコイル 43、および高エネルギービーム輸送系 47 に配置する光学パラメータ調整用のコイルは、出射するビームエネルギーに応じて励磁電流を変える必要がある。よってこれらのコイルについては、空芯構造が積層鋼板コアを用い、1ターンから数ターン程度のコイルにパルス通電する構成とする。セプタムコイル 43 は、ビーム進行方向に2つ以上に分割して配置してもよい。

【0069】

以上が実施例 2 の説明である。実施例 2 に記載によれば、実施例 1 と同様の効果を奏することができる。さらに、以上のような構成とすることで、本発明の円形加速器 39 は、ディグレーダ不要で可変エネルギーのビーム出射ができるため、取出し時に失われるビーム

10

20

30

40

50

電流値を最小限に留めることができ、ビーム利用効率が高くなり、実施例 1 よりもさらに高い線量率を実現できる。また、電氣的に出射エネルギーを変更できるため、ディグレーダ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。

【符号の説明】

【 0 0 7 0 】

1 0 ... 高周波加速空洞	
1 1 ... 加速間隙	
1 2 ... ディー電極	
1 3 ... ダミーディー電極	10
1 4 ... 内導体	
1 5 ... 外導体	
2 0 ... 入力カブラ	
2 1 ... ピックアップループ	
2 2 ... カソード抵抗	
2 3 ... プレート電源	
2 4 ... 三極管	
2 5 ... 加速高周波電源	
2 6 ... プレート電源	
3 0 ... 回転コンデンサ	20
3 1 ... モータ	
3 2 ... 固定電極	
3 3 ... 回転電極	
3 6 ... 磁場勾配用シム	
3 7 ... 磁場補正用シム	
3 8 ... 主磁極	
3 9 ... 円形加速器	
4 0 ... 主電磁石	
4 1 ... ヨーク	
4 2 ... 主コイル	30
4 3 ... セプトムコイル	
4 4 ... ピーラ磁場領域	
4 5 ... リジネレータ磁場領域	
4 6 ... ビーム用貫通孔	
4 7 ... 高エネルギービーム輸送系	
4 8 ... コイル用貫通孔	
4 9 ... 真空引き用貫通孔	
5 0 ... 高周波系用貫通孔	
5 2 ... イオン入射部	
5 3 ... イオン源	40
5 4 ... 低エネルギービーム輸送系	
6 0 ... クライオスタット	
7 0 ... 高周波キッカ	
7 1 ... 接地電極	
7 2 ... 高圧電極	
7 3 ... 突起部	
8 0 ... 最大エネルギー軌道	
8 1 ... 最低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	50

## 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 ... 前段增幅器

1 9 0 ... 回転ガントリ

1 9 1 ... 制御装置

1 9 2 ...照射装置

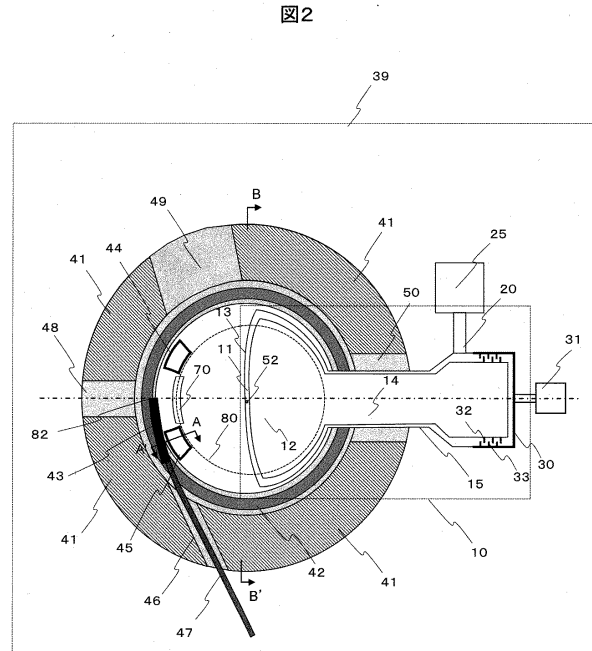
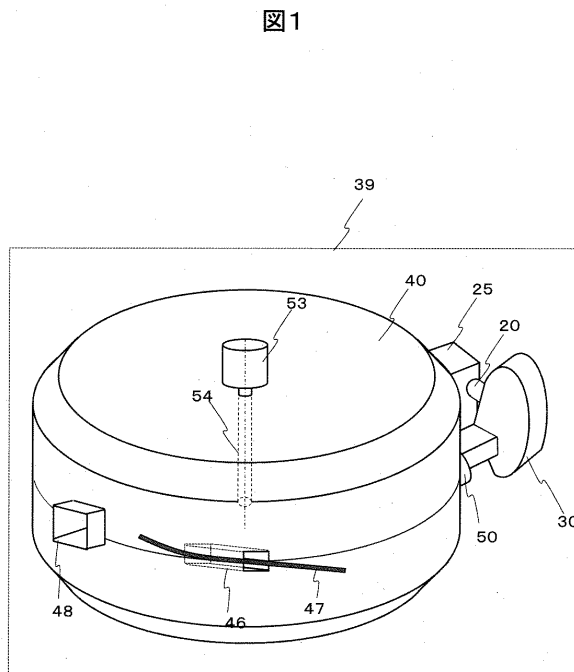
2 0 0 ...患者

2 0 1 ... 治療台

【図面】

【 図 1 】

【圖 2】



10

20

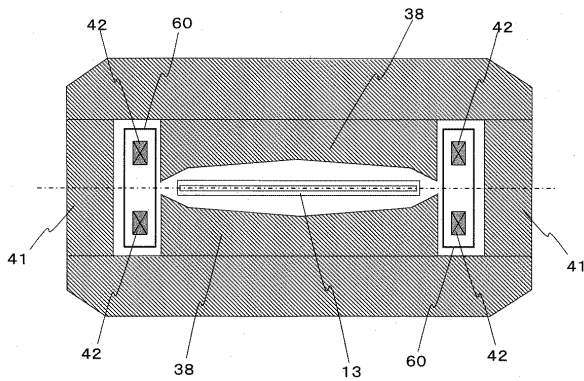
30

40

50

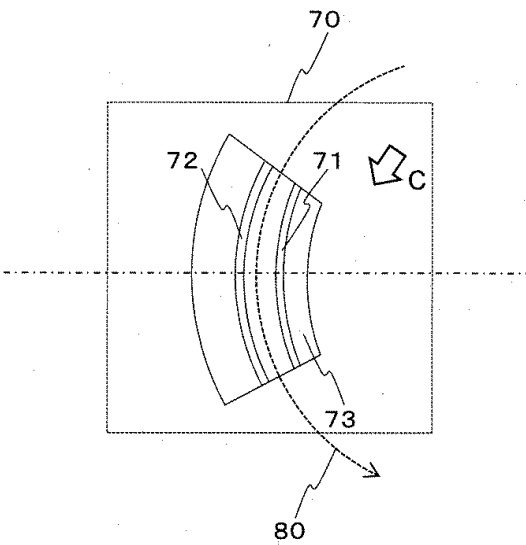
【図3】

図3



【図4】

図4

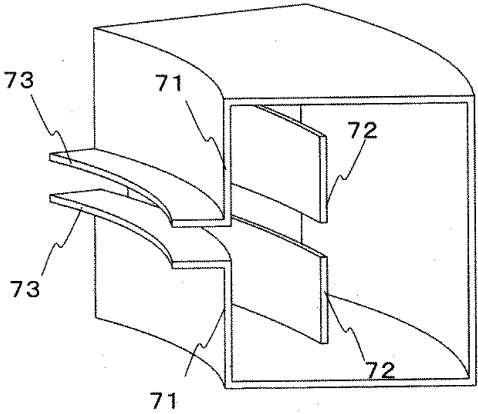


10

20

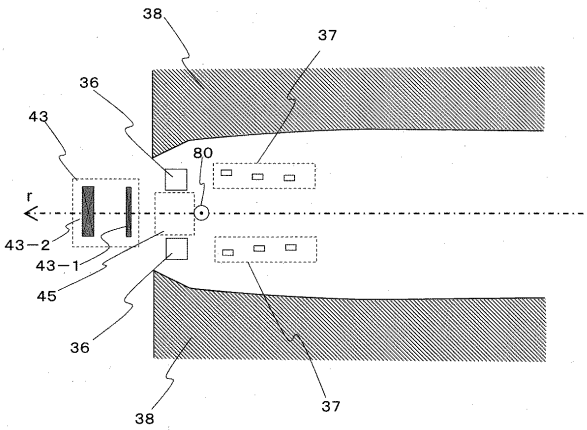
【図5】

図5



【図6】

図6



30

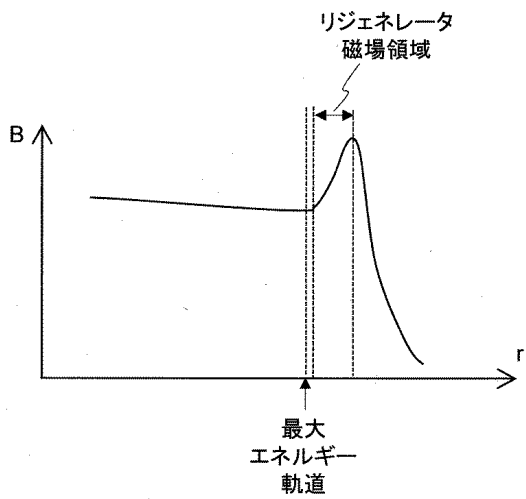
40

50



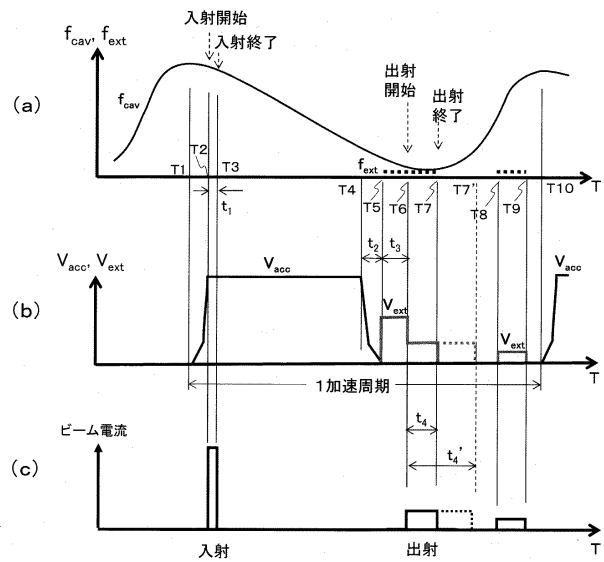
【図 7】

図7



【図 8】

図8

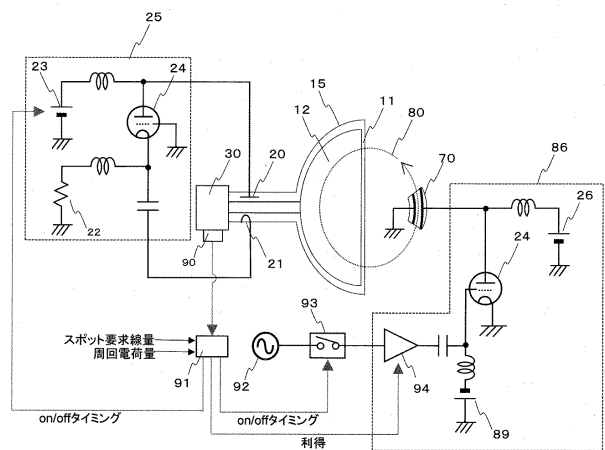


10

20

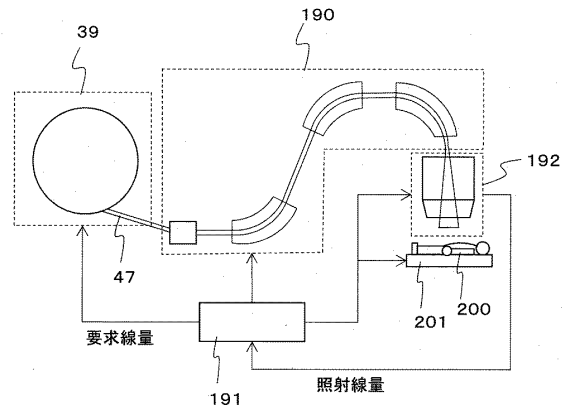
【図 9】

図9



【図 10】

図10



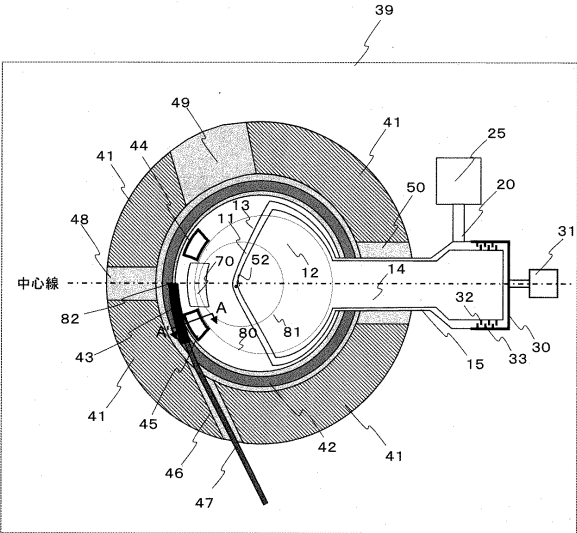
30

40

50

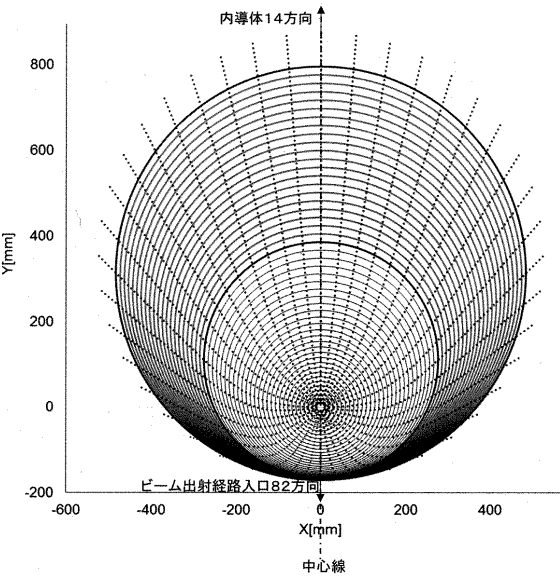
【図 1 1】

図11



【図 1 2】

図12

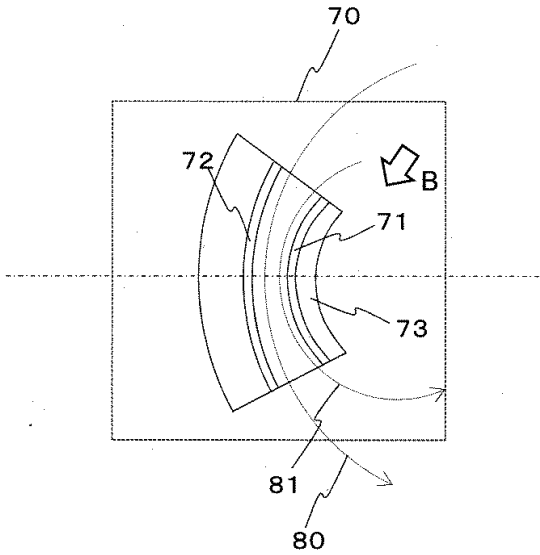


10

20

【図 1 3】

図13



30

40

50

## フロントページの続き

- 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
- (72)発明者 平本 和夫  
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 中尾 太郎
- (56)参考文献 実開昭62-012300(JP, U)  
特開平01-239800(JP, A)  
特開平03-263800(JP, A)  
特開2002-305100(JP, A)  
特開2004-247108(JP, A)  
特開2017-192796(JP, A)  
特開2017-220460(JP, A)  
米国特許第02812463(US, A)  
米国特許出願公開第2016/0270204(US, A1)  
国際公開第2004/039133(WO, A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
H05H 13/00  
A61N 5/10