

(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2011-233475

(P2011-233475A)

(43) 公開日 平成23年11月17日(2011.11.17)

| (51) Int.Cl. | F I | テーマコード (参考) |
|-----------------------------|------------|-------------|
| H05H 13/04 (2006.01) | H05H 13/04 | G 2G085 |
| A61N 5/10 (2006.01) | H05H 13/04 | N 4C082 |
| | A61N 5/10 | H |

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2010-105386 (P2010-105386)
 (22) 出願日 平成22年4月30日 (2010.4.30)

(71) 出願人 301032942
 独立行政法人放射線医学総合研究所
 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
 (74) 代理人 100064414
 弁理士 磯野 道造
 (74) 代理人 100111545
 弁理士 多田 悦夫
 (72) 発明者 水島 康太
 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
 独立行政法人放射線医学総合研究所内
 (72) 発明者 古川 卓司
 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
 独立行政法人放射線医学総合研究所内

最終頁に続く

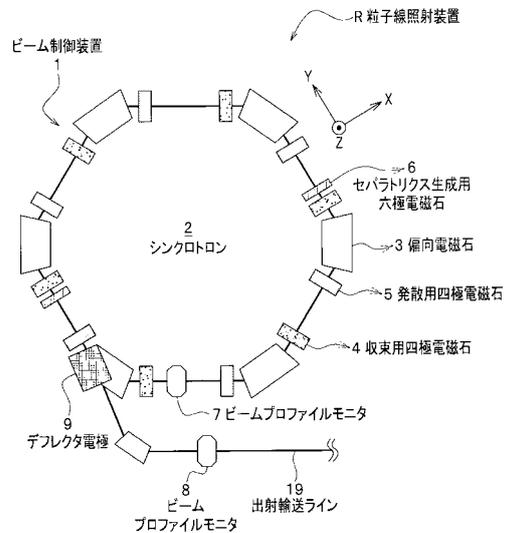
(54) 【発明の名称】 ビーム制御装置、粒子線照射装置、およびこれらの制御方法

(57) 【要約】

【課題】低コストで、線量の揺らぎが防止され設定量の線量が得られるビーム制御装置、粒子線照射装置、およびこれらの制御方法を提供する。

【解決手段】本発明のビーム制御装置は、シンクロトロン2を備え、シンクロトロン2からのベータトロン振動の共鳴を用いた粒子線ビームの取り出しを行うためのビーム制御装置1であって、シンクロトロン2内の粒子線ビームのセパトリクス生成のための共鳴の次数に対応した多極電磁石6と、多極電磁石6の磁場強度を、生成したセパトリクス面積を所望の大きさに保ちながら、高く制御することによって、前記粒子線ビームのビームスピルリップルを所定量以下に低減するビーム制御手段とを備えている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

シンクロトロンを備え、前記シンクロトロンからのベータトロン振動の共鳴を用いた粒子線ビームの取り出しを行うためのビーム制御装置であって、

前記シンクロトロン内の粒子線ビームのセパトリクス生成のための共鳴の回数に対応した多極電磁石と、

前記多極電磁石の磁場強度を、前記生成したセパトリクス面積を所望の大きさに保ちながら、高く制御することによって、前記粒子線ビームのビームスピルリップルを所定量以下に低減するビーム制御手段とを

備えること特徴とするビーム制御装置。

10

【請求項 2】

前記シンクロトロンは、前記粒子線ビームを収束させる収束用四極電磁石と前記粒子線ビームを発散させる発散用四極電磁石とを備え、

前記ビーム制御手段は、前記セパトリクス面積を、前記収束用四極電磁石と前記発散用四極電磁石とのうちの少なくとも何れかの励磁量を変更して線形ベータトロン振動数を共鳴条件から離すことにより、前記所望の大きさに保つ

こと特徴とする請求項 1 記載のビーム制御装置。

【請求項 3】

請求項 1 または請求項 2 記載のビーム制御装置を備える粒子線照射装置。

【請求項 4】

シンクロトロンと該シンクロトロン内の粒子線ビームを制御する機器の制御を担うビーム制御手段とを備え、前記シンクロトロンからのベータトロン振動の共鳴を用いた粒子線ビームの取り出しを行うためのビーム制御装置の制御方法であって、

前記ビーム制御手段は、前記シンクロトロン内の粒子線ビームのセパトリクス生成のための共鳴の回数に対応した多極電磁石の磁場強度を、セパトリクス面積を所望の大きさに保ちながら、高く制御することによって、前記粒子線ビームのビームスピルリップルを所定量以下に低減する

こと特徴とするビーム制御装置の制御方法。

20

【請求項 5】

前記シンクロトロンは、前記粒子線ビームを収束させる収束用四極電磁石と前記粒子線ビームを発散させる発散用四極電磁石とを備え、

前記ビーム制御手段は、前記セパトリクス面積を、前記収束用四極電磁石と前記発散用四極電磁石とのうちの少なくとも何れかの励磁量を変更して線形ベータトロン振動数を共鳴条件から離すことにより、前記所望の大きさに保つ

こと特徴とする請求項 4 記載のビーム制御装置の制御方法。

30

【請求項 6】

請求項 4 または請求項 5 記載のビーム制御装置の制御方法を行う粒子線照射装置の制御方法。

40

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、加速器科学に係り、より詳細には所望量の線量が得られるビーム制御装置、粒子線照射装置、およびこれらの制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、粒子線がん治療においては、シンクロトロン内に設置されているRF-KO電極に印加するRF-KO電圧を、調整することにより、シンクロトロンから取り出される出射ビーム強度を制御している(特許文献1)。

シンクロトロンにおける電磁石には、商用周波数に起因した周波数とその整流等の過程により電源リップルとして現れる。例えば、シンクロトロンから何周かする間に分けて取り出すビームの遅い取り出し(非特許文献1)によるビームスピルには、商用周波数と等しい50Hzまたは60Hzとその倍数の周波数リップルが現れる。

【0003】

シンクロトロンのリング内の電磁石の電源リップルによる磁場の揺れが、ベータトロン振動の共鳴の次数に対応した多極磁場の摂動により生成されるセパラトリクス面積の変化を引き起こす。そのため、セパラトリクス近傍に存在する粒子は、そのセパラトリクス面積の縮小によって共鳴領域に取り出される。

【0004】

図9は、従来の電源リップルによって位相空間上のセパラトリクス面積 S が大きく変動している様子を表す図である。ここで、 X' とは、ビームの進行方向を Y としたときの dX/dY であり、ビーム進行方向に対する粒子の角度である。

図9に示すように、セパラトリクス面積 S の変化である面積増加 S_1 や、面積減少 S_2 が電源リップル周波数に応じて起こるため、結果として、シンクロトロンからの出射ビームにも電源リップル周波数成分が現れるのである。セパラトリクス s の近傍の斜線部に存在する粒子は、セパラトリクス面積 S の変化(面積増加 S_1 、面積減少 S_2)によって共鳴領域に取り出される。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開平5-198397号公報

【特許文献2】特開平8-203700号公報

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】E. Wilson, "Non-Linearities and Resonances", CERN 94-01 v 1 (1994) pp. 239.

【非特許文献2】Takuji Furukawa, et al., "Design study of a raster scanning system for moving target irradiation in heavy-ion radiotherapy", Medical Physics 34 (2007) pp.1085-1097.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかし、粒子線治療のスキャニング照射(非特許文献2)などでは、一定の出射ビーム強度(照射線量率)が求められる。

そのため、大きなビームスピルリップルは線量制御外のスポット移動中での治療計画外超過線量付与を生むため可能な限り避けられるべきである。

そこで、特許文献2には、シンクロトロン内電磁石の電源リップルが原因であるビームスピルリップルを抑えるために、四極電磁石の電流パターンに電源リップルの影響を打ち消す効果がある高周波成分を、取り出し区間のみ重畳して摂動する方法が記載されている

10

20

30

40

50

。

【0008】

具体的には、特許文献2は、シンクロトロンリング内電磁石の電源リップルの影響を打ち消すように四極電磁石電源に摂動を加える。

しかし、この方法ではシステムとして複雑であり、また、僅かなリップルの周波数、位相のずれにも弱いという欠点がある。また、実用化するためには日々毎に、それら電流パターンの洞察が必要であるという問題もある。

本発明は上記実状に鑑み、低コストで、線量の揺らぎが防止され設定量の線量が得られるビーム制御装置、粒子線照射装置、およびこれらの制御方法の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

10

【0009】

上記目的を達成すべく、第1の本発明に関わるビーム制御装置は、シンクロトロンを備え、前記シンクロトロンからのベータトロン振動の共鳴を用いた粒子線ビームの取り出しを行うためのビーム制御装置であって、前記シンクロトロン内の粒子線ビームのセパトリクス生成のための共鳴の次数に対応した多極電磁石と、前記多極電磁石の磁場強度を、前記生成したセパトリクス面積を所望の大きさに保ちながら、高く制御することによって、前記粒子線ビームのビームスピルリップルを所定量以下に低減するビーム制御手段とを備えている。

【0010】

第2の本発明に関わる粒子線照射装置は、第1の本発明のビーム制御装置を備えている

20

。

【0011】

第3の本発明に関わるビーム制御装置の制御方法は、シンクロトロンと該シンクロトロン内の粒子線ビームを制御する機器の制御を担うビーム制御手段とを備え、前記シンクロトロンからのベータトロン振動の共鳴を用いた粒子線ビームの取り出しを行うためのビーム制御装置の制御方法であって、前記ビーム制御手段は、前記シンクロトロン内の粒子線ビームのセパトリクス生成のための共鳴の次数に対応した多極電磁石の磁場強度を、セパトリクス面積を所望の大きさに保ちながら、高く制御することによって、前記粒子線ビームのビームスピルリップルを所定量以下に低減している。

【0012】

30

第4の本発明に関わる粒子線照射装置の制御方法は、第3の本発明のビーム制御装置の制御方法を行う粒子線照射装置の制御方法である。

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、低コストで、線量の揺らぎが防止され設定量の線量が得られるビーム制御装置、粒子線照射装置、およびこれらの制御方法を実現できる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】本発明に関わる実施形態の粒子線照射装置におけるビーム制御装置のシンクロトロンと出射輸送ラインを示す図である。

40

【図2】本実施形態を実施する場合のブロック図である。

【図3】セパトリクス面積がS1からS2に縮小することを示す図である。

【図4】線形ベータトロン振動数と共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)との差の絶対値を一定にした場合のセパトリクス生成用六極電磁石の六極磁場強度とセパトリクス面積の変化の関係を示す図である。

【図5】セパトリクス面積がS2からS3に拡大することを示す図である。

【図6】線形ベータトロン振動数と共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)との差の絶対値を上昇させた場合のセパトリクス生成用六極電磁石の六極磁場強度とセパトリクス面積の変化の関係を示す図である。

【図7】ベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しの手順を示すフロー図である。

50

【図 8】ベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しを実施したことによる効果を示す図である。

【図 9】従来の電源リップルによって位相空間上のセパトリクス面積が大きく変動している様子を表す図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、本発明の実施形態について添付図面を参照して説明する。

図 1 に、実施形態の粒子線照射装置 R におけるビーム制御装置 1 のシンクロトロン 2 と出射輸送ライン 19 を示す。実際の粒子線照射装置 R には、図 1 に示す機器に加え、シンクロトロン 2 への入射ラインや RF (Radio Frequency) 加速空洞などがあるが、図 1 では割愛している。

10

【0016】

< 粒子線照射装置 R >

粒子線照射装置 R は、炭素イオン等の粒子線をスキャニング照射等で対象の患部に所定線量照射する装置である。

粒子線照射装置 R は、シンクロトロン 2 内の粒子線のビームを制御するビーム制御装置 1 を備えている。

【0017】

< 粒子線照射装置 R におけるビーム制御装置 1 のシンクロトロン 2 >

ビーム制御装置 1 のシンクロトロン 2 は、加速高周波の周期を粒子回転周期に同期させることにより、炭素の原子核等の荷電粒子を高エネルギーまで加速する環状の装置である。シンクロトロン 2 は「加速器」に相当する。

20

【0018】

シンクロトロン 2 は、主要構成機器として、シンクロトロン 2 内を進む粒子線のビームを周回軌道に保つための偏向電磁石 3 と、周回軌道上における粒子線のビームの広がりを収束させる収束用四極電磁石 4 と、当該ビームの広がりを発散させる発散用四極電磁石 5 と、ベータトロン振動の三次共鳴を励起し、位相空間上で安定周回領域と共鳴領域を分割・形成するセパトリクス生成用六極電磁石 6 と、照射量をモニタするシンクロトロン 2 のリング内のビームプロファイルモニタ 7 および出射輸送ライン 19 のビームプロファイルモニタ 8 と、粒子線のビームを出射輸送ライン 19 に向けて出射するためのデフレクタ電極 9 を備えている。なお、セパトリクスとは、安定周回領域と共鳴領域の間のことである。

30

【0019】

粒子線照射装置 R の制御は、図示しない制御手段によって行われる。粒子線照射装置 R の制御手段は、ビーム制御装置 1 の粒子線のビームを制御する機器の制御を担うビーム制御手段を有している。

制御手段、ビーム制御手段は、コンピュータ、回路等で構成される。

【0020】

< シンクロトロン 2 からの粒子線の取り出し >

図 1 に示すシンクロトロン 2 内の周回軌道を周回している多数の粒子は、水平方向(図 1 の紙面に平行方向: X 軸方向)又は鉛直方向(図 1 の紙面に垂直方向: Z 軸方向)に振動しながら周回している。この振動をベータトロン振動といい、ベータトロン振動は、収束用四極電磁石 4、発散用四極電磁石 5 などにより制御することができる。なお、Y 軸方向とは、シンクロトロン 2 内を粒子線のビームが進行する方向(シンクロトロン 2 内の周回の接線方向)とし、X 軸方向は水平面における Y 軸方向に垂直な方向とする。

40

【0021】

これら粒子が RF 加速空洞(図示せず)によって加速され最大エネルギーに達した後、シンクロトロン 2 内で周回している多数の粒子の一部を、粒子線のビームに RF - KO 電極(図示せず)で RF - KO 電圧による電場を印加することにより、デフレクタ電極 9 を用いて、治療室(照射室)において照射対象に取り出した粒子線を照射する照射装置(図示せず)

50

に続く出射輸送ライン 19 へ向けて出射する。

具体的には、シンクロトロン 2 内の粒子線のビームをシンクロトロン 2 外の照射装置に続く出射輸送ライン 19 に向けて取り出すため、シンクロトロン 2 内の中心付近に分布する粒子線のビームに、周回軌道に対し垂直かつ水平方向に RF - KO 電極で挟んで RF - KO 電圧による電場を印加し、粒子線のビームサイズを水平方向に広げる。この粒子の出射は、シンクロトロン 2 内の周回軌道を進む粒子のベータトロン振動の共鳴を利用して行われる。

【 0 0 2 2 】

詳細には、RF - KO 電極は、出射輸送ライン 19 への取り出し前のシンクロトロン 2 の周回軌道を加速されて進むビームに対して、周回軌道に垂直かつ水平方向(図 1 の紙面に平行方向)に、ベータトロン振動に共鳴する周波数変調および振幅変調された RF - KO 電圧による電場を印加し、周回軌道を進む粒子線のビームの幅を広げることにより、粒子線のビームの一部をデフレクタ電極 9 の 2 枚の電極の中に入れる。デフレクタ電極 9 の 2 枚の電極の中にビームが入ると、デフレクタ電極 9 内の電場によって、粒子線のビームは外側に蹴りだされ、出射輸送ライン 19 に向けて取り出されていく。

なお、RF - KO 電圧がオフのときには、この粒子のビームサイズの増加が止まるために、粒子線のビームがデフレクタ電極 9 から取り出されなくなるので、照射を止めることが可能となる。

【 0 0 2 3 】

ここで、図 9 に示すセパトリクス s の面積であるセパトリクス面積 S の変化を抑制する。そのため、セパトリクス面積 S を保ちながら、シンクロトロン 2 を周回する振動であるベータトロン振動の三次共鳴による粒子線の遅い取り出しにおいてセパトリクス生成に用いられる共鳴の次数に対応した多極電磁石のセパトリクス生成用六極電磁石 6 の磁場強度を高くなるようにビーム制御手段で制御する。

【 0 0 2 4 】

これにより、従来と同量の電源リップルと比較して、セパトリクス面積 S の変化(図 9 の面積増加 S_1 、面積減少 S_2)を小さくする。しかし、セパトリクス生成用六極電磁石 6 の磁場強度を高めた場合、セパトリクス面積 S が小さくなる。

そこで、セパトリクス面積 S を所定の大きさに保つため、セパトリクス生成用六極電磁石 6 の磁場強度の増加に合わせて、ビーム制御手段により、収束用四極電磁石 4 と発散用四極電磁石 5 とのうちの少なくとも何れかの励磁量を変更して線形成分でのベータトロン振動数を m 次(m はセパトリクス s (図 3 参照)が何角形かに相当)の共鳴条件 n / m (n は m の倍数を除く自然数)から離し、安定領域のセパトリクス面積 S が大きくなるようにしている。

【 0 0 2 5 】

例えば、ビーム制御手段により、収束用四極電磁石 4 の励磁量を上げて線形成分でのベータトロン振動数を m 次の共鳴条件 n / m から離し、安定領域のセパトリクス面積 S を大きくする。

このように、粒子線のビームのセパトリクス面積 S の変化(図 9 の面積増加 S_1 、面積減少 S_2)を抑えることにより、それまでセパトリクス面積 S の縮小により共鳴領域に取り出されていた粒子数(図 9 の面積増加 S_1 、面積減少 S_2 における粒子数)を減らすことができ、結果として、電源リップルによるビームスピルリップルを低減することができる。

【 0 0 2 6 】

< ビーム制御装置 1 のシンクロトロン 2 からの粒子線の遅い取り出しの作用(現象) >

図 2 では、ベータトロン振動の三次共鳴による粒子線の遅い取り出しを例にとり、本実施形態を実施する場合のブロック図を示す。

図 3 は、セパトリクス s のセパトリクス面積 S が S_1 から S_2 に縮小することを示す図である。ここで、 X' とは、ビームの進行方向を Y としたときの dX / dY であり、ビーム進行方向に対する粒子の角度である。なお、後記の図 5、図 8 も同様である。

10

20

30

40

50

図2の(1)で、シンクロトロン2内のセパトリクス生成用六極電磁石6(図1参照)の磁場強度のみをビーム制御手段で上げると、図3に示すように、セパトリクスsのセパトリクス面積SがS1(図3の破線で示す)からS2(図3の実線で示す)に縮小してしまう。

【0027】

図4は、線形ベータトロン振動数を一定にした場合のセパトリクス生成用六極電磁石6の六極磁場強度とセパトリクス面積Sの変化の関係を示す図である。図4は、横軸にセパトリクス生成用六極電磁石6の六極磁場強度をとり、縦軸にセパトリクス面積S、線形ベータトロン振動数と共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)との差の絶対値をとっている。

10

図4に示すように、線形ベータトロン振動数を一定にし、セパトリクス生成用六極電磁石6の六極磁場強度をビーム制御手段により上げた場合、セパトリクス面積Sが減少することが分る。

【0028】

そのため、図2の(2)で、シンクロトロン2のリング内にあるビームプロファイルモニター7、または、出射輸送ライン19にあるビームプロファイルモニター8のどちらかあるいは両方を用いて線量を測定する。

そして、図2の(3)で、測定する線量が所定量となるセパトリクス面積Sを保つように、収束用四極電磁石4と発散用四極電磁石5とのうちの少なくとも何れかの励磁量をビーム制御手段で変更して、線形ベータトロン振動数を共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)から離すことにより、図5に示すように、セパトリクス面積S2をセパトリクス面積S3に拡大する。図5は、セパトリクスsのセパトリクス面積SがS2からS3に拡大することを示す図である。

20

【0029】

その後、図2の(4)で、線量の揺らぎを測定し、線量の揺らぎが所定量を超える場合、図2の(1)に移行する。

ビーム制御手段により、シンクロトロン2内の粒子線のビームの線量の揺らぎが所定量以内、かつ、セパトリクス面積Sが所望の大きさになるまで、図2に示す制御が行われる。

図6は、線形ベータトロン振動数と共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)との差の絶対値を上昇させた場合のセパトリクス生成用六極電磁石6の六極磁場強度とセパトリクス面積Sの変化の関係を示す図である。図6は、横軸にセパトリクス生成用六極電磁石6の六極磁場強度をとり、縦軸にセパトリクス面積S、線形ベータトロン振動数と共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)との差の絶対値をとっている。

30

【0030】

図6に示すように、線形ベータトロン振動数と共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数)との差の絶対値を上昇させた場合、セパトリクス生成用六極電磁石6の六極磁場強度をビーム制御手段で上げて、セパトリクス面積Sの大きさが維持されることが分かる。

上述の現象を定性的に説明する。

40

粒子線のビームのセパトリクスsは、粒子線のビームがシンクロトロン2を周回する際の線形ベータトロン振動数と共鳴条件 n/m との差の絶対値が大きいほど、セパトリクス面積S(図8参照)が大きくなる。また、摂動として用いられるセパトリクス生成用六極電磁石6の多極磁場強度が大きいほど、セパトリクス面積S(図8参照)が小さくなる。商用周波数(50Hzまたは60Hz)の電源リップルは、線形ベータトロン振動数とセパトリクス生成用六極電磁石6の多極磁場強度を変化させてしまうので、セパトリクス面積Sも変化してしまう。

【0031】

そこで、セパトリクス面積Sを保ったまま、線形ベータトロン振動数と共鳴条件 n/m との差の絶対値(A)とセパトリクス生成用六極電磁石6の多極磁場強度(B)との

50

どちらも大きくしている状態の方が、同じ量だけ電源リップルにより線形ベータトロン振動数と共鳴条件 n/m との差の絶対値 (A) とセパトリス生成用六極電磁石 6 の多極磁場強度 (B) が変化 (変化分 ΔA 、 ΔB) しても、 $\Delta A/A$ 、 $\Delta B/B$ がそれぞれ小さくなるので電源リップルの影響を小さくできる。

【0032】

<ベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しの手順>

次に、ベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しの手順について、図7に従って説明する。図7は、ベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しの手順を示すフロー図である。

なお、以下のビーム制御装置1の制御は、前記したビーム制御手段によって行われる。また、以下のフローでは、粒子線のビームの揺らぎを所定量内にし、かつ、粒子線のビームのセパトリス面積 S を所定の大きさにする制御を説明する。

【0033】

まず、図7の $S101$ で、所望の線量になるようにセパトリス生成用六極電磁石6の磁場強度を設定する。続いて、図1に示すシンクロトロン2のリング内にあるビームプロファイルモニター7、または、出射輸送ライン19にあるビームプロファイルモニター8のどちらかあるいは両方を用いて線量を測定する ($S102$)。そして、測定した線量を基に、セパトリス面積 S を演算する ($S103$)。

【0034】

続いて、測定した粒子線のビームの線量の電源リップル周波数成分等による揺らぎが所定量内、かつ、セパトリス面積 S が所定の大きさか否か判定する ($S104$)。

測定した粒子線のビームの線量の揺らぎが所定量内、かつ、セパトリス面積 S が所定の大きさの場合 ($S104$ で Yes)、終了する。

測定した粒子線のビームの線量の揺らぎが所定量内、かつ、セパトリス面積 S が所定の大きさでない場合 ($S104$ で No)、 $S105$ で、測定した粒子線のビームの線量の揺らぎ (図9のセパトリス s の面積増加 $S1$ 、面積減少 $S2$) が所定量内であるか否か判定する ($S105$)。

【0035】

測定した粒子線のビームの線量の揺らぎが所定量内でない場合 ($S105$ で No)、セパトリス生成用六極電磁石6の磁場強度を増加させる。これにより、図3に示すように、セパトリス s のセパトリス面積 S が $S1$ から $S2$ に縮小する ($S106$)。その後、 $S102$ に移行する。

【0036】

一方、 $S105$ で、測定した粒子線のビームの線量の揺らぎが所定量内であると判定された場合 ($S105$ で Yes)、セパトリス面積 S が所定の大きさでないので、収束用四極電磁石4または発散用四極電磁石5のうちの少なくとも何れかの励磁量を変更してセパトリス面積 S が所定の大きさになるように調整する。例えば、セパトリス面積 S が所望の大きさより小さい場合、線形ベータトロン振動数を共鳴条件 $n/3$ (n は3の倍数を除く自然数) から離すことにより、図5に示すように、セパトリス面積 $S2$ をセパトリス面積 $S3$ に拡大する。その後、 $S102$ に移行する。

以上が、図7に示すベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しの手順である。

【0037】

図8に、上述のベータトロン振動の三次共鳴による遅い取り出しを実施したことによる効果を示す。

図8に示すように、従来の図9に示す同量の電源リップル (図9のセパトリス面積 S の面積増加 $S1$ 、面積減少 $S2$ に相当) に対して、セパトリス面積 S の変動量が小さくなる。そのため、セパトリス面積 S の変化によって共鳴領域に取り出される粒子が存在する領域 (図9の破線で囲まれた領域 $S1$ 、 $S2$) を小さくできる。その結果、出射されるビームスピルリップルに現れる電源リップル周波数成分を抑えることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 8 】

上記構成によれば、リング内電磁石の電源リップルによるビームへの影響自体を、電源に摂動等を加えること無しに抑えられ、コストが低い。

また、粒子線治療のスキャンニング照射などで求められるような、低リップルで一定の出射ビーム強度（照射線量率）が供給可能となる。さらに、日々の電流パターンの調整も不要であり、再現性が高く、実用的に非常に優れている。

【 0 0 3 9 】

なお、前記実施形態では、ベータトロン振動の三次共鳴と六極電磁石を用いた粒子線の遅い取り出しを例示したが、ベータトロン振動の二次共鳴と八極電磁石、または、四次共鳴と八極電磁石など、共鳴の次数に対応していれば、別の多極電磁石との組み合わせでもよい。

10

【 0 0 4 0 】

また、本発明は、RF-KO電極を用いた遅い取り出しに限るものでない。例えば、四重極電磁石励磁電流変更によるベータトロン振動数制御を用いたビーム強度制御装置（ビーム制御装置）、及びビームエネルギー変更によるベータトロン振動数制御手法を用いたビーム強度制御装置（ビーム制御装置）であってもよい。または、ビームエネルギーを変化させることができる誘導加速装置または高周波加速装置などのビーム加速装置（ビーム制御装置）であってもよい。

【 0 0 4 1 】

また、四重極電磁石励磁電流変更によるベータトロン振動数制御手法を用いたビーム強度制御装置（ビーム制御装置）において、四重極電磁石の電源を制御することで、励磁電流を変化させてもよい。四重極電磁石は、一般にシンクロトロン中に複数設けられているが、少なくともその一つを制御することでも効果を得ることができる。

20

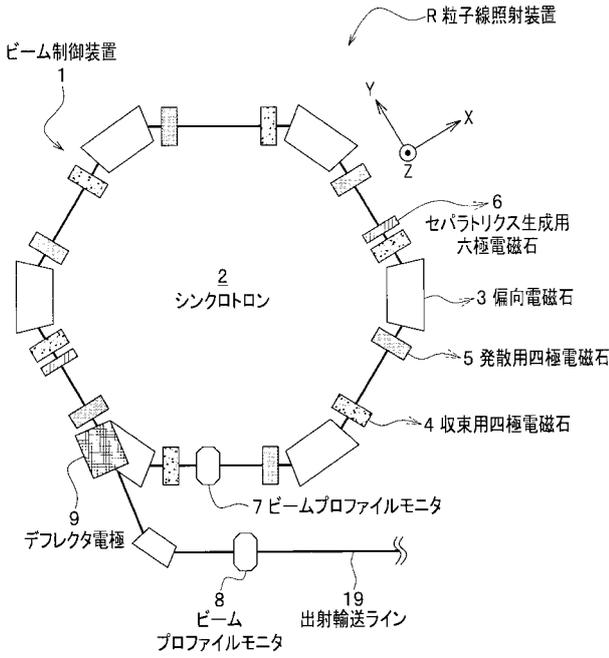
【 符号の説明 】

【 0 0 4 2 】

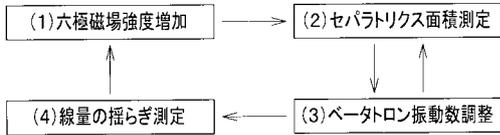
- 1 ビーム制御装置
- 2 シンクロトロン
- 4 収束用四極電磁石（収束用電磁石、機器）
- 5 発散用四極電磁石（発散用電磁石、機器）
- 6 セパラトリクス生成用六極電磁石（多極電磁石、機器）
- R 粒子線照射装置
- S セパラトリクス
- S セパラトリクス面積

30

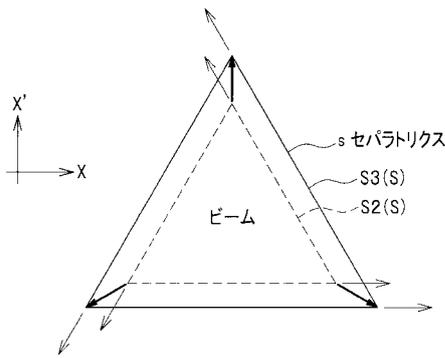
【 図 1 】



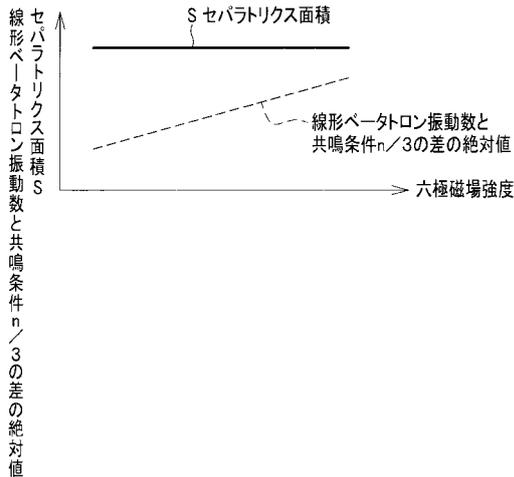
【 図 2 】



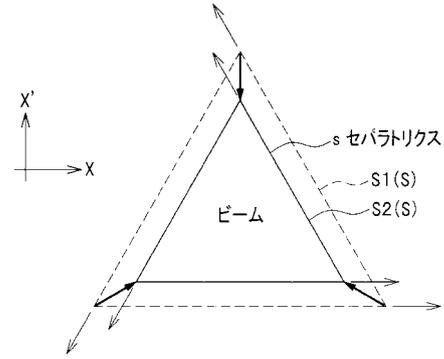
【 図 5 】



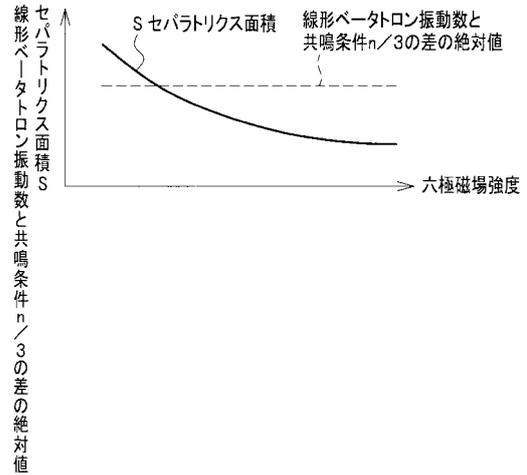
【 図 6 】



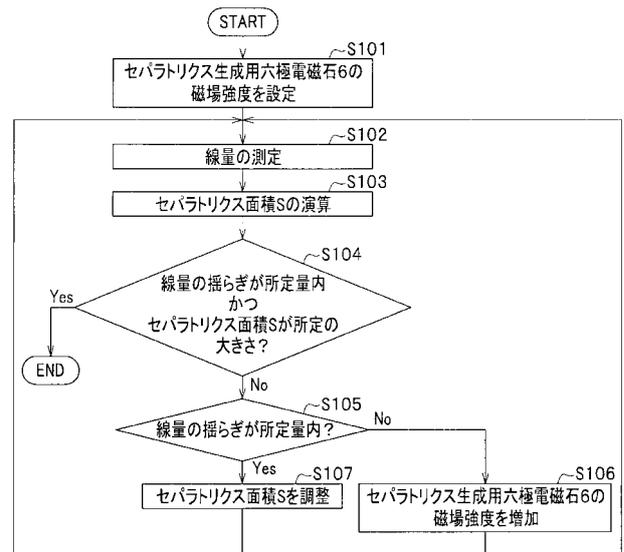
【 図 3 】



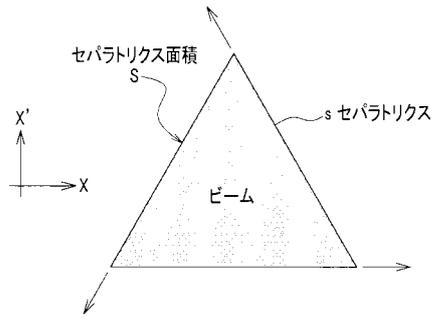
【 図 4 】



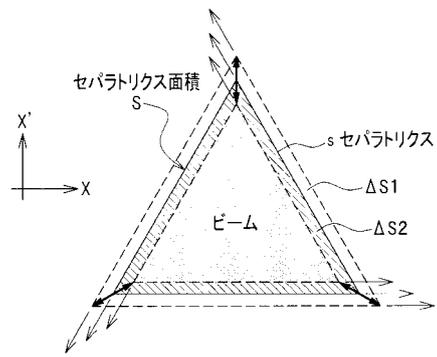
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



フロントページの続き

(72)発明者 白井 敏之

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内

(72)発明者 野田 耕司

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内

Fターム(参考) 2G085 AA13 BA13 BA15 BC15 EA07

4C082 AA01 AC04 AE01 AG12