

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2015年1月15日(15.01.2015)

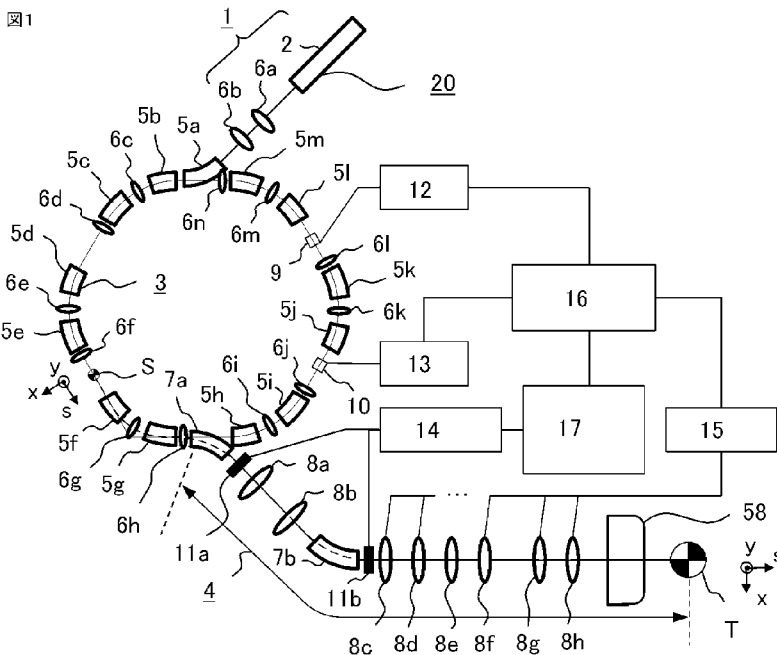


(10) 国際公開番号  
WO 2015/004772 A1

- (51) 国際特許分類:  
A61N 5/10 (2006.01)
  - (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/068981
  - (22) 国際出願日: 2013年7月11日(11.07.2013)
  - (25) 国際出願の言語: 日本語
  - (26) 国際公開の言語: 日本語
  - (71) 出願人: 三菱電機株式会社(MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 Tokyo (JP).
  - (72) 発明者: 花川 和之(HANAKAWA Kazushi); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 菅原 賢悟(SUGAHARA Kengo); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 小田原 周平(ODAWARA Shuhei); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP).
  - (74) 代理人: 大岩 増雄, 外(OIWA Masuo et al.); 〒6610033 兵庫県尼崎市南武庫之荘3丁目3番5号 Hyogo (JP).
  - (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
  - (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:  
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: BEAM TRANSPORT SYSTEM AND PARTICLE THERAPY DEVICE

(54) 発明の名称: ビーム輸送系及び粒子線治療装置



(57) Abstract: The objective of the present invention is to provide a beam transport system which is capable of enabling chromatic aberration of a beam at an irradiation position of the beam to be nearly zero even when the beam is emitted from a small synchrotron. According to this beam transport system (4), an optical parameter calculation device (17) calculates a starting point momentum dispersion function which is a momentum dispersion function ( $\eta$ ,  $\eta'$ ) of a charged particle beam (31) at a design starting point (S) of the beam transport system (4) set on a beam orbit of an accelerator (3) on the basis of a beam time variation related quantity which is a time variation amount of a beam position or a beam diameter in a beam profile monitor (11) calculated by a beam analysis device (14), and calculates an optical parameter in which the starting point momentum dispersion function and an original condition at an irradiation position (T) at which profile data was detected are initial conditions.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2015/004772 A1

---

小型化のシンクロトロンから出射されるビームであっても、ビームの照射位置においてビームの色収差をほぼゼロにできるビーム輸送系を得ることを目的とする。本発明のビーム輸送系(4)によれば、光学パラメータ計算装置(17)が、ビーム解析装置(14)により計算された、ビームプロファイルモニター(11)における、ビーム位置の時間変動量またはビーム径であるビーム時間変動関連量に基づいて、加速器(3)のビーム軌道に設定されたビーム輸送系(4)の設計始点(S)における荷電粒子ビーム(31)の運動量分散関数( $\eta$ ,  $\eta'$ )である始点運動量分散関数を計算し、始点運動量分散関数と、プロファイルデータを検出した際の照射位置(T)における当初条件とを初期条件とした光学パラメータを計算することを特徴とする。

## 明 細 書

発明の名称： ビーム輸送系及び粒子線治療装置

### 技術分野

[0001] 本発明は、陽子や重粒子などの荷電粒子からなる荷電粒子ビームを輸送するビーム輸送系及び、輸送された荷電粒子ビームを物体、人体等の被照射体に照射する粒子線治療装置に関するものである。

### 背景技術

[0002] 一般に、粒子線治療装置は、荷電粒子ビームを発生するビーム発生装置と、ビーム発生装置につながれ、発生した荷電粒子ビームを加速する加速器と、加速器で設定されたエネルギーまで加速された後に出射される荷電粒子ビームを輸送する荷電粒子ビーム輸送系と、ビーム輸送系の下流側に設置され、荷電粒子ビームを照射対象に照射するための粒子線照射装置とを備える。

[0003] 一般に、ビーム輸送系は、加速器のビーム軌道上の1点と、ビーム照射位置（アイソセンタ）とに2つの基準点を設定して、光学パラメータを設計している。加速器のビーム軌道上の1点は、光学パラメータ設計の始点となり、ビーム照射位置、特にその中心であるアイソセンタは光学パラメータ設計の終点となる。具体的には、ビーム輸送系は、加速器と当該ビーム輸送系（高エネルギービーム輸送装系（HEBT系））との取り合い点（始点）でのビーム初期条件を設計値として、当該ビーム輸送系の電磁石の強度を計算し、電磁石にその強度（励磁電流）を設定し、照射位置にビームが到達するように、ビームを運んでいた。

[0004] 加速器が小型医療用のシクロトロンである場合、シクロトロンの初期値が理想値（設計値）であっても、シクロトロンの電磁石類の想定していない磁場（工作誤差などで発生する磁場）のため、六極電磁石を適切に配置してもHardtの条件を満たさず、セパトリクスの出射枝がエネルギーにより異なることがあった。このため、エネルギー値により前記取り合い点でのビームの角度（傾き）や位置が異なる現象（色収差）があり、加速器のビ

ーム出射法によっては、照射位置でのビームの位置が動いたり、ビーム径が大きくなったりする現象が発生していた。

[0005] ビームの角度（傾き）や位置が異なる現象である色収差が発生する理由を説明する。図15は位相空間における始点でのビームの動きを説明する図であり、図16はビーム軌道を説明する図である。図15の横軸はビーム軌道中心軸に垂直なx方向の距離 $\Delta X$ であり、縦軸は $\Delta X$ のビーム軌道中心軸に対する傾き $\Delta X'$ である。図16の横軸はビームの進行方向に延伸するs軸であり、縦軸はx方向の距離 $\Delta X$ である。図16に、ビーム軌道変更に関わる偏向電磁石63と四極電磁石64の位置、始点S、終点Tを示した。図16の上側にはビーム出射が理想的な場合を示し、図16の下側にはビーム出射が理想からずれた場合を示した。

[0006] 従来、始点Sでのビームは動きが無いとして、図16の楕円62で示した想定位相空間分布を有するビームと仮定して、ビーム輸送系のビーム光学系を設計していた。しかし、実際のビームは、時間によって位相空間分布が61a、61b、61cのように変化している位相空間分布60を有している。実際のビームは、図5に示すように断続的に電流値がゼロとゼロ以外の値とを繰り返しており、時刻t1、t2、t3でビームの位相空間分布が異なっている。例えば、ビームの位相空間分布は、時刻t1（スパイル始め）の場合は位相空間分布61aであり、時刻t2（スパイル中央）の場合は位相空間分布61bであり、時刻t3（スパイル終わり）の場合は位相空間分布61cである。

[0007] ビーム出射が理想的な場合は、図16の上側に示すように、始点Sでの位相空間におけるビームは動きが無くても、上流側ではビーム軌道65a、65b、65cのように変動するが、下流側では偏向電磁石63と四極電磁石64の励磁電流の調整により、ビーム軌道がビーム軸（s軸）に一致し、終点Tにおいて色収差が発生しないように調整可能である。しかしながら、ビーム出射が理想的な状態からずれた場合、すなわち位相空間分布が時間的に変動する場合は、図16の下側に示すように、下流側においてもビーム軌道

66 a、66 b、66 cのように変動し、照射位置である終点Tにおいて色収差が発生する。例えば、ビーム軌道66 aは位相空間分布61 aに対応する軌道であり、ビーム軌道66 bは位相空間分布61 bに対応する軌道であり、ビーム軌道66 cは位相空間分布61 cに対応する軌道である。ビーム出射が理想的な状態からずれた場合は、終点Tにおいて色収差が発生するので、ビーム径が広がり、ビーム位置（重心位置）がビーム軸（s軸）から離れた位置になる。

[0008] 実際のビーム輸送系では、始点Sでのビームの位相空間分布の時間変動があり、このビームの位相空間分布の時間変動を考慮しない場合は、上述したように終点Tにおいて色収差が発生してしまうので、終点Tにおいて色収差をゼロにするためには始点Sでのビームの位相空間分布の時間変動を考慮する必要がある。

[0009] 特許文献1には、ビームサイズの調整を容易にするために、ビームサイズ調整の自動化を実現する手法が記載されている。特許文献1の荷電粒子ビーム輸送装置は、加速器の出口から照射装置の入口までの間に設置された複数のプロファイルモニタで測定されたビームサイズとビームプロファイルに基づいて、四極電磁石等のビーム収束装置の収束力に対するビームサイズの関係を示す感度行列を算出する感度計算装置と、設定されたビームサイズの調整目標値から感度行列を用いてビームの収束力を算出する励磁電流補正量計算装置を備えており、励磁電流補正量計算装置で計算した励磁電流によりビーム収束装置を制御している。特許文献1のビームサイズの調整方法は、ビーム輸送の荒調整後にプロファイルモニタにより測定したビームサイズとビームプロファイルから感度行列を求め、感度行列を用いて各ビーム収束装置の励磁電流を算出し、この励磁電流で各ビーム収束装置を励磁する調整を行い、ビームサイズが所望値に十分に近づくまで、繰り返していた。

## 先行技術文献

### 特許文献

[0010] 特許文献1：特開2011-206237号公報（0037段～0049段、

0057段～0061段、図1、図3)

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0011] 特許文献1の荷電粒子ビーム輸送装置（ビーム輸送系に相当）は、ビームサイズが所望値に十分に近づくように、プロファイルモニタで測定したビームサイズの感度行列を用いて、各ビーム収束装置の励磁電流を算出し、この励磁電流で各ビーム収束装置を励磁する調整を繰り返すことで、ビームサイズの調整を行っていた。しかしながら、特許文献1の荷電粒子ビーム輸送装置は、光学パラメータ設計の始点及び終点において色収差を考慮していないので、ビーム輸送経路上のプロファイルモニタで測定したビームサイズが所望値にできたとしても、照射位置でのビームの色収差をほぼゼロにすることはできない。また、小型化されたシンクロトロンの場合は、上述したようにビーム輸送系の光学パラメータ設計の始点において色収差をゼロにすることは困難なので、特許文献1のビームサイズの調整方法を小型化されたシンクロトロンに適用すると、ビーム調整の繰り返し回数が増加する。特許文献1のビームサイズの調整方法では、ビーム調整はできたとしても、やはり照射位置でのビームの色収差をほぼゼロにすることはできない問題があった。

[0012] 小型化のシンクロトロンの場合に、ビーム輸送系の光学パラメータ設計の始点において色収差をゼロにしようとする、高性能な偏向電磁石や四極電磁石や六極電磁石を用いることが必要になり、加速器やビーム輸送系の大型や複雑化を招き、加速器やビーム輸送系が高額になってしまう問題があった。

[0013] 本発明は上記のような課題を解決するためになされたものであり、小型化のシンクロトロンから出射されるビームであっても、ビームの照射位置においてビームの色収差をほぼゼロにできるビーム輸送系を得ることを目的とする。

### 課題を解決するための手段

[0014] 本発明に係るビーム輸送系は、荷電粒子ビームを偏向する、少なくとも1つの偏向電磁石と、荷電粒子ビームを収束または発散させる、少なくとも2

つの四極電磁石と、荷電粒子ビームのプロファイルデータを検出する、少なくとも1つのビームプロファイルモニタと、プロファイルデータに基づいて、ビームプロファイルモニタにおける、ビーム位置の時間変動量またはビーム径であるビーム時間変動関連量を計算するビーム解析装置と、ビーム輸送系の光学パラメータを計算する光学パラメータ計算装置と、光学パラメータ計算装置により計算された光学パラメータに基づいて、偏向電磁石及び四極電磁石の励磁電流を設定する電磁石電源と、を備える。本発明に係るビーム輸送系の光学パラメータ計算装置は、ビーム時間変動関連量に基づいて、加速器のビーム軌道上に設定されたビーム輸送系の設計始点における荷電粒子ビームの運動量分散関数である始点運動量分散関数を計算し、始点運動量分散関数と、プロファイルデータを検出した際の照射位置における当初条件とを初期条件とした光学パラメータを計算することを特徴とする。

### 発明の効果

[0015] 本発明に係るビーム輸送系によれば、ビーム時間変動関連量に基づいた設計始点における荷電粒子ビームの始点運動量分散関数と、プロファイルデータを検出した際の照射位置における当初条件とを初期条件として計算された光学パラメータに基づいて、偏向電磁石及び四極電磁石の励磁電流を設定するので、小型化のシンクロトロンから出射されるビームであっても、ビームの照射位置においてビームの色収差をほぼゼロにできる。

### 図面の簡単な説明

[0016] [図1]本発明による粒子線治療装置の概略構成図である。

[図2]図1の粒子線照射装置の構成を示す図である。

[図3]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系における補正前のビーム軌道を示す図である。

[図4]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系における補正後のビーム軌道を示す図である。

[図5]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系に出射されるビーム電流を説明する図である。

[図6]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系の始点における位相空間分布を示す図である。

[図7]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系の終点における補正前の位相空間分布を示す図である。

[図8]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系の終点における補正後の位相空間分布を示す図である。

[図9]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系の終点における補正前のビームスポット配置を示す図である。

[図10]本発明の実施の形態1によるビーム輸送系の終点における補正後のビームスポット配置を示す図である。

[図11]本発明の実施の形態2によるビーム輸送系における補正前のビーム軌道及びビーム径を示す図である。

[図12]本発明の実施の形態2によるビーム輸送系における補正後のビーム軌道及びビーム径を示す図である。

[図13]本発明の実施の形態3によるビーム輸送系における補正前のビーム軌道を示す図である。

[図14]本発明の実施の形態3によるビーム輸送系における補正後のビーム軌道を示す図である。

[図15]位相空間における始点でのビームの動きを説明する図である。

[図16]ビーム輸送系におけるビーム軌道を説明する図である。

### 発明を実施するための形態

[0017] 実施の形態1.

図1は本発明による粒子線治療装置の概略構成図であり、図2は本発明による粒子線照射装置の構成を示す図である。粒子線治療装置20は、入射系1と、加速器3と、ビーム輸送系4と、粒子線照射装置58を備える。入射系1は、入射器2と、四極電磁石6a、6bを有する。加速器3は、複数の偏向電磁石5a、5b、5c、5d、5e、5f、5g、5h、5i、5j、5k、5l、5mと、複数の四極電磁石6c、6d、6e、6f、6g、



6 h、6 i、6 j、6 k、6 l、6 m、6 nと、加速空洞9と、x方向キック電極10と、RF加速電源12と、RFキック電源13と、機器制御装置16とを備える。ビーム輸送系4は、複数の偏向電磁石7 a、7 bと、複数の四極電磁石8 a、8 b、8 c、8 d、8 e、8 f、8 g、8 hと、ビームプロファイルモニタ11 a、11 bと、ビーム解析装置14と、電磁石電源15と、光学パラメータ計算装置17とを有する。入射系1及び加速器3の四極電磁石の符号は、総括的に6を用い、区別して説明する場合に6 a乃至6 nを用いる。加速器3の偏向電磁石の符号は、総括的に5を用い、区別して説明する場合に5 a乃至5 mを用いる。ビーム輸送系4の偏向電磁石の符号は、総括的に7を用い、区別して説明する場合に7 a、7 bを用いる。ビーム輸送系4の四極電磁石の符号は、総括的に8を用い、区別して説明する場合に8 a乃至8 hを用いる。ビームプロファイルモニタの偏向電磁石の符号は、総括的に11を用い、区別して説明する場合に11 a、11 bを用いる。

[0018] 偏向電磁石5、7は荷電粒子ビームを偏向し、四極電磁石6、8は、荷電粒子ビームを収束または発散させる。荷電粒子ビームのビーム座標系は、荷電粒子ビームの進行方向（s方向）の軸をs軸、s軸に垂直で、加速器3の周回軌道面の外に広がる方向であるx方向の軸をx軸、s軸及びy軸に垂直なy方向の軸をy軸と呼ぶことにする。加速空洞9は加速器3内を周回する荷電粒子ビームを加速する。x方向キック電極10は、ビーム輸送系4に荷電粒子ビームを出射するために、周回方向から外周側（x方向）へ電場で押す電極である。ビームプロファイルモニタ11は荷電粒子ビームのビーム位置やビームの大きさ等を計算するためのビームプロファイルデータを検出する。ビーム輸送系4は、荷電粒子ビームを、粒子線照射装置58を経由して照射位置Tまで輸送する。

[0019] 入射器2のイオン源で発生した陽子線等の粒子線である荷電粒子ビームは、入射器2の前段加速器で加速され、四極電磁石6 a、6 bにより荷電粒子ビームを収束または発散させて加速器3に入射される。ここでは、加速器3

は、シンクロトロンを例に説明する。荷電粒子ビームは、所定のエネルギーまで加速される。荷電粒子ビームは、加速器 3 に設置された偏向電磁石 7 a からビーム輸送系 4 に入り、粒子線照射装置 5 8 を経由して照射位置 T まで輸送され、患者の照射対象 4 5 (図 2 参照) である患部に照射される。粒子線照射装置 5 8 は荷電粒子ビームを所望の照射野を形成するように、ビームを拡大したり、ビームを走査したりして照射対象 4 5 (図 2 参照) に照射する。

[0020] 図 2 において、粒子線照射装置 5 8 は、荷電粒子ビーム 3 1 に垂直な方向である X 方向及び Y 方向に荷電粒子ビーム 3 1 を走査する X 方向走査電磁石 3 2 及び Y 方向走査電磁石 3 3 と、位置モニタ 3 4 と、線量モニタ 3 5 と、線量データ変換器 3 6 と、ビームデータ処理装置 4 1 と、走査電磁石電源 3 7 と、粒子線照射装置 5 8 を制御する照射管理装置 3 8 とを備える。照射管理装置 3 8 は、照射制御計算機 3 9 と照射制御装置 4 0 とを備える。線量データ変換器 3 6 は、トリガ生成部 4 2 と、スポットカウンタ 4 3 と、スポット間カウンタ 4 4 とを備える。なお、図 2 において荷電粒子ビーム 3 1 の進行方向は -Z 方向である。なお、-Z 方向は、ビーム座標系の s 方向であるが、図 2 における X 方向、Y 方向は、ビーム座標系の x 方向、y 方向とは必ずしも一致しない。

[0021] X 方向走査電磁石 3 2 は荷電粒子ビーム 3 1 を X 方向に走査する走査電磁石であり、Y 方向走査電磁石 3 3 は荷電粒子ビーム 3 1 を Y 方向に走査する走査電磁石である。位置モニタ 3 4 は、X 方向走査電磁石 3 2 及び Y 方向走査電磁石 3 3 で走査された荷電粒子ビーム 3 1 が通過するビームにおける通過位置 (重心位置) やサイズを演算するためのビーム情報を検出する。ビームデータ処理装置 4 1 は、位置モニタ 3 4 が検出した複数のアナログ信号 (ビーム情報) からなるビーム情報に基づいて荷電粒子ビーム 3 1 の通過位置 (重心位置) やサイズを演算する。また、ビームデータ処理装置 4 1 は、荷電粒子ビーム 3 1 の位置異常やサイズ異常を示す異常検出信号を生成し、この異常検出信号を照射管理装置 3 8 に出力する。

[0022] 線量モニタ 35 は、荷電粒子ビーム 31 の線量を検出する。照射管理装置 38 は、図示しない治療計画装置で作成された治療計画データに基づいて、照射対象 45 における荷電粒子ビーム 31 の照射位置を制御し、線量モニタ 35 で測定され、線量データ変換器 36 でデジタルデータに変換された線量が目標線量に達すると荷電粒子ビーム 31 を次の照射位置へ移動する。走査電磁石電源 37 は、照射管理装置 38 から出力された X 方向走査電磁石 32 及び Y 方向走査電磁石 33 への制御入力（指令）に基づいて X 方向走査電磁石 32 及び Y 方向走査電磁石 33 の設定電流を変化させる。

[0023] ここでは、粒子線照射装置 58 のスキャンニング照射方式を、ハイブリッドスキャンニング照射方式（ビーム照射位置（スポット）を変更する場合にビームを停止しない方式）、具体的には、荷電粒子ビーム 31 の照射位置を変えるときに荷電粒子ビーム 31 を停止させないラスタースキャンニング照射方式のように行い、スポットスキャンニング照射方式のようにビーム照射位置がスポット位置間を次々と移動していく方式として説明する。スポットカウンタ 43 は、荷電粒子ビーム 31 のビーム照射位置が停留している間の照射線量を計測するものである。スポット間カウンタ 44 は、荷電粒子ビーム 31 のビーム照射位置が移動している間の照射線量を計測するものである。トリガ生成部 42 は、ビーム照射位置における荷電粒子ビーム 31 の線量が目標照射線量に達した場合に、線量満了信号を生成するものである。

[0024] 荷電粒子ビーム 31 を RF スイープ法にて加速器 3 からビーム出射させる場合のビーム輸送系 4 を示す。図 1 の粒子線治療装置 20 の入射系 1、加速器（シンクロトロン） 3、ビーム輸送系 4 において、後述する手順で、照射位置 T においてほぼ色収差がない（ビームが動かない）光学系を得る。図 3 は本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系における補正前のビーム軌道を示す図である。図 3 では、ビーム輸送系 4 の光学系を設計する始点 S から終点（照射位置） T までを、直線状にして表示してある。図 3 の横軸は荷電粒子ビーム 31 の進行方向の軸である s 軸であり、縦軸は x 方向の距離  $\Delta X$  である。図 5 は、本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系に出射されるビー

ム電流を説明する図である。図6は、本発明の実施の形態1によるビーム輸送系の始点における位相空間分布を示す図である。図6の横軸はビーム軌道中心軸に垂直なx方向の距離 $\Delta X$ であり、縦軸は $\Delta X$ のビーム軌道中心軸に対する傾き $\Delta X'$ である。

[0025] 前述したように、実際の荷電粒子ビーム31は、断続的に電流値がゼロとゼロ以外の値とを繰り返しており、時刻 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ で荷電粒子ビーム31の位相空間分布が異なっている。例えば、荷電粒子ビーム31の位相空間分布23は、時刻 $t_1$ （スピル始め）の場合は位相空間分布24aであり、時刻 $t_2$ （スピル中央）の場合は位相空間分布24bであり、時刻 $t_3$ （スピル終わり）の場合は位相空間分布24cである。図3のビーム軌道21aは、時刻 $t_1$ （スピル始め）の場合のビーム軌道であり、位相空間分布24aに対応したビーム軌道である。ビーム軌道21bは、時刻 $t_2$ （スピル中央）の場合のビーム軌道であり、位相空間分布24bに対応したビーム軌道である。ビーム軌道21cは、時刻 $t_3$ （スピル終わり）の場合のビーム軌道であり、位相空間分布24cに対応したビーム軌道である。

[0026] ステップS1にて、シンクロトロン（加速器3）が理想状態である場合の光学パラメータを、光学パラメータ計算装置17で算出する。その光学パラメータは、機器制御装置16に出力され、機器制御装置16は、光学パラメータに基づいて、各電磁石の電流値を計算し、電磁石電源15に電流値を送付する。電磁石電源15が、ビーム輸送系4の電磁石（偏向電磁石7、四極電磁石8）の電流を設定する。なお、電磁石電源15は、入射系1と加速器3の電磁石（偏向電磁石5、四極電磁石6）の電流も設定する。

[0027] ステップS2にて、機器制御装置16により、加速器3の光学パラメータに対応した指令値をRF加速電源12、電磁石電源15に送り、それらの指令値に従い、各装置（偏向電磁石5、四極電磁石6、加速空洞9）を駆動し、荷電粒子ビーム31を加速、出射させる。なお、ここではRFスイープ法なので、出射時には、RF加速電源12のRF周波数を適切に挿引するが、RFキック電源13は駆動させない。図1ではx方向キック電極10、RF

キック電源 13 を記載しているが、RF スweep 法ではこれらは使用しないので、加速器 3 から削除しても構わない。

[0028] ステップ S3 にて、ビームプロファイルモニタ 11a、11b で、加速器 3 から出射された荷電粒子ビーム 31 の各時間でのプロファイルデータを取得し、ビーム解析装置 14 で、ビーム位置を解析する。プロファイルデータを取得する時間は、出射始めから出射終わりまでの時間であり、図 5 の時刻  $t_1$  から  $t_3$  までの時間である。

[0029] ステップ S4 にて、プロファイルデータの位置変動情報から、式 (1)、式 (2) で表せる運動量分散関数  $\eta_a$ 、 $\eta_b$  を算出する。 $p$  は運動量であり、 $\Delta p$  は基準となる時刻  $t_0$  における運動量との運動量差分であり、 $\Delta x$  は基準となる時刻  $t_0$  における  $x$  方向の位置との位置差分である。なお、添え字  $a$  は、ビームプロファイルモニタ 11a における数値であることを示しており、添え字  $b$  は、ビームプロファイルモニタ 11b における数値であることを示している。

[0030] [数1]

数1

$$\begin{aligned}\Delta x_a &= \eta_a \cdot \Delta p / p \\ \Delta x_a' &= \eta_a \cdot \Delta p / p\end{aligned}\quad \dots(1)$$

[0031] [数2]

数2

$$\begin{aligned}\Delta x_b &= \eta_b \cdot \Delta p / p \\ \Delta x_b' &= \eta_b \cdot \Delta p / p\end{aligned}\quad \dots(2)$$

[0032] ステップ S5 にて、始点 S における運動量分散関数 ( $\eta_x$ ,  $\eta_x'$ )、( $\eta_y$ ,  $\eta_y'$ ) 及び光学パラメータを算出し、機器制御装置 16 に出力する。ビームプロファイルモニタ 11a、11b での運動量分散関数は、それぞれ式 (3)、式 (4) で表せる。なお、右辺の添え字  $i$  は入力を示しており、すなわち始点 S を示している。式 (3)、式 (4) における、 $M_a$ 、 $M_b$

は始点Sからビームプロファイルモニタ11a、11bまでのビーム輸送行列であり、式(5)、式(6)で表せる。

[0033] [数3]

数3

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_a = M_a \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots(3)$$

[0034] [数4]

数4

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_b = M_b \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots(4)$$

[0035] [数5]

数5

$$M_a = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_a \quad \dots(5)$$

[0036] [数6]

数6

$$M_b = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_b \quad \dots(6)$$

[0037] 光学パラメータ計算装置17にて、式(3)、式(4)より始点Sの運動量分散化関数 $(\eta_x, \eta_x')$ 、 $(\eta_y, \eta_y')$ を算出する。例えば、図6の位相空間分布23となるような運動量分散化関数 $(\eta_x, \eta_x')$ 、 $(\eta_y, \eta_y')$ を算出する。終点Tである照射位置での運動量分散関数が $(0, 0)$ となる(条件1)光学パラメータを、式(7)から算出し、光学パラメータ計算装置17に出力する。この条件1は、ビームプロファイルモニ

タ 1 1 によるプロファイルデータを検出した際の照射位置（終点 T）における当初条件である。

[0038] [数7]

数7

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_f = M_f \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots(7)$$

[0039] ステップ S 6 にて、再度、機器制御装置 1 6 が、電磁石電源 1 5 に条件 1 となる光学パラメータに基づいた電流値を転送し、各電磁石に所定の電流を設定する。

[0040] 各電磁石がステップ S 6 の電流値に設定された場合は、図 4、図 9、図 1 0 に示すように照射位置（終点 T）でビームが動かなくなり、図 7、図 8 に示すように色収差がほぼゼロ（実質的にゼロ）になる。図 4 は、本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系における補正後のビーム軌道を示す図である。図 7 は本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系の終点における補正前の位相空間分布を示す図であり、図 8 は本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系の終点における補正後の位相空間分布を示す図である。図 9 は本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系の終点における補正前のビームスポット配置を示す図であり、図 1 0 は本発明の実施の形態 1 によるビーム輸送系の終点における補正後のビームスポット配置を示す図である。

[0041] 図 4 のビーム軌道 2 2 a は、時刻 t 1（スピル始め）の場合の補正後のビーム軌道であり、図 3 のビーム軌道 2 1 a が補正されたビーム軌道である。ビーム軌道 2 2 b は、時刻 t 2（スピル中央）の場合の補正後のビーム軌道であり、図 3 のビーム軌道 2 1 b が補正されたビーム軌道である。ビーム軌道 2 2 c は、時刻 t 3（スピル終わり）の場合の補正後のビーム軌道であり、図 3 のビーム軌道 2 1 c が補正されたビーム軌道である。なお、図 4 のビーム軌道 2 2 b は、補正後でも図 3 のビーム軌道 2 1 b と同じく、s 軸上に載っている。

[0042] 図7、図8の横軸はビーム軌道中心軸に垂直なx方向の距離 $\Delta X$ であり、縦軸は $\Delta X$ のビーム軌道中心軸に対する傾き $\Delta X'$ である。図9、図10の横軸は前述したビーム座標系のx軸であり、縦軸はビーム座標系のy軸である。図7に示すように、ビーム輸送系4の終点Tにおける補正前の位相空間分布は、位相空間分布25であり、時刻t1（スピル始め）の場合は位相空間分布26aであり、時刻t2（スピル中央）の場合は位相空間分布26bであり、時刻t3（スピル終わり）の場合は位相空間分布26cである。図8に示すように、ビーム輸送系4の終点Tにおける補正後の位相空間分布は、位相空間分布27であり、時刻t1（スピル始め）の場合は位相空間分布28aであり、時刻t2（スピル中央）の場合は位相空間分布28bであり、時刻t3（スピル終わり）の場合は位相空間分布28cである。図8では、分かり易くするために、位相空間分布28a、28b、28cが多少ずれているように記載しているが、色収差がほぼゼロ（実質的にゼロ）になっている。色収差がほぼゼロ（実質的にゼロ）の場合は、位相空間上のビーム位置は時間によらず一定である。このように、実施の形態1のビーム輸送系4の終点Tにおける補正前の位相空間分布25は色収差が大きいが、補正後の位相空間分布27は色収差がほぼゼロ（実質的にゼロ）になっている。

[0043] 補正前の位相空間分布25は、 $\Delta X$ が $-4.2\text{ mm}$ から $4.1\text{ mm}$ であり、補正後の位相空間分布27は、 $\Delta X$ が $-2.0\text{ mm}$ から $2.0\text{ mm}$ である。図3に示したように、補正前では終点Tにおいてビーム軌道の変動があり、ビームサイズは計画値からずれて広がっている。なお、ビームサイズは位相分布における $\Delta X$ の下限から上限までの幅値とは異なるが、 $\Delta X$ の幅値が大きいほどビームサイズは大きくなる。図4に示したように、補正後のビーム軌道は、ビームプロファイルモニタ11bの設置位置以降では、ビーム軌道22a、22b、22cのいずれもs軸上に載っている。終点Tにおける補正後のビーム軌道は変動がないので、終点Tにおけるビームサイズは計画通りのビームサイズになっており、すなわち終点Tにおけるビームサイズが計画値からずれて大きくならない。



[0044] 図9、図10を用いて、スキャンニング照射のスポット配置と均一照射の線量分布について説明する。荷電粒子ビーム31のスポット配置のずれが見易くなるように、図9、図10に破線の格子を追加した。破線の格子の角が計画されたスポット位置である。図9に示すように、x方向の色収差がある補正前の場合は、広がりのあるビームの重心（図9、図10の各円の中心）が、x方向の位置においてずれている。これに対して、図10に示すように、x方向の色収差がない補正後の場合は、広がりのあるビームの重心が、破線の格子の角に一致しており、x方向の位置が計画通りになっている。スポット位置が計画からずれている場合は、均一照射に照射しようとしても、計画した照射スポットに対する照射線量が異なるので、実際の線量分布に凹凸が生じてしまう。実施の形態1のビーム輸送系4は、終点Tにおいて色収差がほぼゼロ（実質的にゼロ）にでき、スキャンニング照射のスポット位置を計画通りにすることができる。

[0045] 実施の形態1のビーム輸送系4は、粒子線照射装置58を動作させない照射位置（終点T）、すなわちアイソセンタにおいて、荷電粒子ビーム31の色収差をゼロにでき、スキャンニング照射のスポット位置を計画通りにすることができる。荷電粒子ビーム31は、粒子線照射装置58で広い照射野を形成するように走査されるが、走査された照射位置ではビームの色収差がゼロでなくても、ビームの照射位置が許容範囲となっていれば高精度な粒子線治療はできるので、照射位置の許容範囲となるようなゼロではない色収差であってもよい。したがって、上記のように設計された実施の形態1のビーム輸送系4は、荷電粒子ビーム31の照射位置においてビームの色収差をほぼゼロ（実質的にゼロ）にでき、スキャンニング照射のスポット位置を高精度に計画通りにすることができる。

[0046] 実施の形態1のビーム輸送系4は、小型化のシンクロトロンの場合であっても、高性能な偏向電磁石や四極電磁石や六極電磁石を用いて、ビーム輸送系4の光学パラメータ設計の始点Sにおいて色収差をゼロにしなくても、荷電粒子ビーム31の照射位置においてビームの色収差をほぼゼロ（実質的に

ゼロ)にできる。したがって、実施の形態1のビーム輸送系4は、小型化のシンクロトロンの場合であっても、加速器やビーム輸送系の大型や複雑化を招くことなく、加速器やビーム輸送系を著しく高額になることを抑制することができる。

[0047] 実施の形態1で示したビーム輸送系4の設計方法は、理想的磁場条件で設定したビーム輸送系において、ビームプロファイルモニタ11で検出されたプロファイルデータを用いてビーム輸送系4の途中のビーム位置を測定し、ビームプロファイルモニタ11におけるビーム位置の時間変動量であるビーム時間変動関連量を計算することにより、ビーム取り合い点(始点S)における初期条件の一部であるx方向運動量分散関数 $\eta_x$ 、 $\eta_x'$ 及びy方向運動量分散関数 $\eta_y$ 、 $\eta_y'$ を始点運動量分散関数として算出し、プロファイルデータを検出した際の照射位置(終点T)における当初条件である前記条件1と、始点運動量分散関数とを初期条件にして、ビーム輸送系4の新たな光学パラメータを設定するものである。この設計方法を適用することで、設置現場でも調整が容易になり、従来のように何度も調整しなければならないものとは異なり、ビーム輸送系の調整時間を従来に比べて短縮することができる。

[0048] ビーム輸送系4における偏向電磁石7及び四極電磁石8の台数について説明する。照射位置(終点T)で荷電粒子ビーム31がx方向に動かないようにする場合は、x方向に偏向する偏向電磁石7を1台以上配置し、当該偏向電磁石7の上流にx方向の収束発散を制御する四極電磁石8を2台以上配置する。図3、図4では、偏向電磁石7bと四極電磁石8a、8bが必要最小限の偏向電磁石7及び四極電磁石8である。また、照射位置(終点T)で荷電粒子ビーム31がy方向に動かないようにする場合は、y方向に偏向する偏向電磁石7を1台以上配置し、当該偏向電磁石7の上流にy方向の収束発散を制御する四極電磁石8を2台以上配置する。

[0049] 図1、図3、図4では、ビーム輸送系4において、y方向に偏向する偏向電磁石7は記載していないが、例えば偏向電磁石7bより下流側に配置し、

この y 方向に偏向する偏向電磁石 7 の上流の四極電磁石 8 の 2 台を y 方向の収束発散を制御する四極電磁石とすればよい。図 1 の例では、周回中の荷電粒子ビーム 3 1 を x 方向に動かしてビーム輸送系 4 に導入するので、始点 S における y 方向の色収差は加速器 3 に配置された偏向電磁石 5 及び四極電磁石 6 により十分小さくすることができる。したがって、始点 S における y 方向の色収差が大きい場合に、照射位置（終点 T）で荷電粒子ビーム 3 1 が y 方向に動かないようにする y 方向用の偏向電磁石 7 及び四極電磁石 8 を配置すればよい。

[0050] 以上のように、実施の形態 1 のビーム輸送系 4 によれば、荷電粒子ビーム 3 1 を偏向する、少なくとも 1 つの偏向電磁石 7 と、荷電粒子ビーム 3 1 を収束または発散させる、少なくとも 2 つの四極電磁石 8 と、荷電粒子ビーム 3 1 のプロファイルデータを検出する、少なくとも 1 つのビームプロファイルモニタ 1 1 と、プロファイルデータに基づいて、ビームプロファイルモニタ 1 1 における、ビーム位置の時間変動量またはビーム径であるビーム時間変動関連量を計算するビーム解析装置 1 4 と、ビーム輸送系 4 の光学パラメータを計算する光学パラメータ計算装置 1 7 と、光学パラメータ計算装置 1 7 により計算された光学パラメータに基づいて、偏向電磁石 7 及び四極電磁石 8 の励磁電流を設定する電磁石電源 1 5 と、を備える。実施の形態 1 のビーム輸送系 4 の光学パラメータ計算装置 1 7 は、ビーム時間変動関連量に基づいて、加速器 3 のビーム軌道上に設定されたビーム輸送系 4 の設計始点（始点 S）における荷電粒子ビーム 3 1 の運動量分散関数  $\eta$ 、 $\eta'$  である始点運動量分散関数を計算し、始点運動量分散関数と、プロファイルデータを検出した際の照射位置（終点 T）における当初条件とを初期条件とした光学パラメータを計算することを特徴とするので、小型化のシンクロトロンから出射されるビームであっても、ビームの照射位置（終点 T）においてビームの色収差をほぼゼロにできる。

[0051] 実施の形態 1 の粒子線治療装置 2 0 によれば、荷電粒子ビーム 3 1 を加速する加速器 3 と、加速器 3 から出射された荷電粒子ビーム 3 1 を照射位置（

終点T)へ輸送するビーム輸送系4と、ビーム輸送系4の下流側に配置され、荷電粒子ビーム31を所望の照射野を形成するように、照射対象45に照射する粒子線照射装置58と、を備える。実施の形態1の粒子線治療装置20によれば、ビーム輸送系4が、荷電粒子ビーム31を偏向する、少なくとも1つの偏向電磁石7と、荷電粒子ビーム31を収束または発散させる、少なくとも2つの四極電磁石8と、荷電粒子ビーム31のプロファイルデータを検出する、少なくとも1つのビームプロファイルモニタ11と、プロファイルデータに基づいて、ビームプロファイルモニタ11における、ビーム位置の時間変動量またはビーム径であるビーム時間変動関連量を計算するビーム解析装置14と、ビーム輸送系4の光学パラメータを計算する光学パラメータ計算装置17と、光学パラメータ計算装置17により計算された光学パラメータに基づいて、偏向電磁石7及び四極電磁石8の励磁電流を設定する電磁石電源15と、を備える。実施の形態1の粒子線治療装置20によれば、光学パラメータ計算装置17は、ビーム時間変動関連量に基づいて、加速器3のビーム軌道上に設定されたビーム輸送系4の設計始点(始点S)における荷電粒子ビーム31の運動量分散関数 $\eta$ 、 $\eta'$ である始点運動量分散関数を計算し、始点運動量分散関数と、プロファイルデータを検出した際の照射位置(終点T)における当初条件とを初期条件とした光学パラメータを計算することを特徴とするので、小型化のシンクロトロンから出射されるビームであっても、ビームの照射位置(終点T)においてビームの色収差をほぼゼロにでき、ビームの照射位置(終点T)を高精度に制御することができる。

[0052] 実施の形態2.

実施の形態1では、荷電粒子ビーム31をRFスイープ法にて加速器3からビーム出射させる場合のビーム輸送系4を説明した。実施の形態2では、荷電粒子ビーム31をRFロックアウト法にて加速器3からビーム出射させる場合のビーム輸送系4を説明する。図1の粒子線治療装置20の入射系1、加速器(シンクロトロン)3、ビーム輸送系4において、後述する手順で

、照射位置 T においてほぼ色収差がなく（ビームを動かなく）、さらにビーム径が大きくなる光学系を得る。RF ノックアウト法は、シンクロトロン出射点で、ある時刻に様々なエネルギーの粒子を混在させた出射方法である。このため RF ノックアウト法は、ビーム輸送系 4 の光学系を設計する始点 S における運動量分散関数  $(\eta_x, \eta_x')$ 、 $(\eta_y, \eta_y')$  や、ツイス (twiss) パラメータ  $(\alpha_x, \beta_x)$ 、 $(\alpha_y, \beta_y)$  が不明な状況で、ビームを輸送させることになる。したがって、図 11 のように、照射位置（終点 T）において色収差のためビーム径が大きくなり観測される。これを実施の形態 2 の設計方法で修正することにより、図 12 のように、照射位置（終点 T）において小さな径のビームを得ることができる。

[0053] 図 11 は本発明の実施の形態 2 によるビーム輸送系における補正前のビーム軌道及びビーム径を示す図であり、図 12 は本発明の実施の形態 2 によるビーム輸送系における補正後のビーム軌道及びビーム径を示す図である。図 11、図 12 の上側では、ビーム輸送系 4 の光学系を設計する始点 S から終点（照射位置） T までを、直線状にして表示してある。図 11、図 12 の下側では、上側から引いた破線で示した s 軸上の位置に対するビーム径を模式的に円で示した。図 11 のビーム軌道 46 a は、式 (1)、式 (2) の  $\Delta p/p > 0$  の場合のビーム軌道である。図 11 のビーム軌道 46 b は、式 (1)、式 (2) の  $\Delta p/p = 0$  の場合のビーム軌道であり、図 11 のビーム軌道 46 c は、式 (1)、式 (2) の  $\Delta p/p < 0$  の場合のビーム軌道である。始点 S におけるビーム径は符号 47 a で示した円の直径であり、終点 T におけるビーム径は符号 47 g で示した円の直径である。始点 S から終点 T の間に、5 つのビーム径を符号 47 b、47 c、47 d、47 e、47 f の円の直径で示した。

[0054] 図 11 と同様に、図 12 のビーム軌道 48 a は、式 (1)、式 (2) の  $\Delta p/p > 0$  の場合のビーム軌道である。図 12 のビーム軌道 48 b は、式 (1)、式 (2) の  $\Delta p/p = 0$  の場合のビーム軌道であり、図 12 のビーム軌道 48 c は、式 (1)、式 (2) の  $\Delta p/p < 0$  の場合のビーム軌道であ

る。始点Sにおけるビーム径は符号49aで示した円の直径であり、終点Tにおけるビーム径は符号49gで示した円の直径である。始点Sから終点Tの間に、5つのビーム径を符号49b、49c、49d、49e、49fの円の直径で示した。

[0055] ステップS11にて、シンクロトロン（加速器3）が理想状態である場合の光学パラメータを、光学パラメータ計算装置17で算出する。その光学パラメータは、機器制御装置16に出力され、機器制御装置16は、光学パラメータに基づいて、各電磁石の電流値を計算し、電磁石電源15に電流値を送付する。電磁石電源15が、ビーム輸送系4の電磁石（偏向電磁石7、四極電磁石8）の電流を設定する。なお、電磁石電源15は、入射系1と加速器3の電磁石（偏向電磁石5、四極電磁石6）の電流も設定する。

[0056] ステップS12にて、機器制御装置16により、加速器3の光学パラメータに対応した指令値をRF加速電源12、電磁石電源15に送り、それらの指令値に従い、各装置（偏向電磁石5、四極電磁石6、加速空洞9、x方向キック電極10）を駆動し、荷電粒子ビーム31を加速、出射させる。なお、ここではRFロックアウト法なので、出射時には、RF加速電源12のRF周波数を変化させず、RFキック電源13を駆動させ、横方向（x方向）のエミッタンスを増加させることで、荷電粒子ビーム31を出射させる。なお、エミッタンスは、ビームの位相空間上の面積に相当するものである。

[0057] ステップS13にて、ビームプロファイルモニタ11a、11bで、加速器3から出射された荷電粒子ビーム31の各時間でのプロファイルデータを取得し、ビーム解析装置14で、ビーム径を解析する。プロファイルデータを取得する時間は、出射始めから出射終わりまでの時間であり、図5の時刻t1からt3までの時間である。RFロックアウト法では、ある運動量幅をもった荷電粒子ビーム31が同時に加速器3から出射される。そこで、ビーム径は、式(11)、式(12)、式(13)を用いて計算する。

[0058] 一般に、式(11)の行列で表せる輸送行列Mで、ビームを輸送する場合、ビームのツイスパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は式(12)のように輸送される。

また、輸送されたところのビーム径  $r$  は、式 (13) で表せる。式 (12) の右辺におけるツイスパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は、輸送行列  $M$  で輸送前のものであり、式 (12) の左辺におけるツイスパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は、輸送行列  $M$  で輸送後のものである。式 (12) のツイスパラメータの輸送行列  $M_t$  の各要素は、式 (11) の輸送行列  $M$  における要素  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{13}$ 、 $m_{21}$ 、 $m_{22}$ 、 $m_{23}$  を用いて記載されている。式 (13) において、 $r_x$  は  $x$  方向のビーム径であり、 $\varepsilon_x$  は  $x$  方向のエミッタンスであり、 $\beta_x$  は  $x$  方向のツイスパラメータ  $\beta$  であり、 $\eta_x$  は  $x$  方向の運動量分散関数である。

[0059] [数8]

数8

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots(11)$$

[0060] [数9]

数9

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & -2m_{11}m_{12} & m_{12}^2 \\ -m_{21}m_{11} & 1+2m_{12}m_{21} & -m_{12}m_{22} \\ m_{21}^2 & -2m_{22}m_{21} & m_{22}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix} \quad \dots(12)$$

[0061] [数10]

数10

$$r_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} + \eta_x \cdot \Delta p / p \quad \dots(13)$$

[0062] ステップS14にて、ビームプロファイルモニタ11a、11bでの荷電粒子の光学式を求める。ビームプロファイルモニタ11aでの荷電粒子の光学式は、式(14)、式(17)、式(20)で表される。ビームプロファイルモニタ11bでの荷電粒子の光学式は、式(23)、式(26)、式(29)で表される。まず、ビームプロファイルモニタ11aでの荷電粒子の光学式について説明する。なお、以下に示す式における添え字  $i$  は入力を示

しており、すなわち始点Sを示している。以下に示す式における添え字 a は、ビームプロファイルモニタ 1 1 a における数値であることを示しており、添え字 b は、ビームプロファイルモニタ 1 1 b における数値であることを示している。添え字 x は、該当する変数が x 方向の値であることを示している。

[0063] [数11]

数11

$$\begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_a = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & -2m_{11}m_{12} & m_{12}^2 \\ -m_{21}m_{11} & 1+2m_{12}m_{21} & -m_{12}m_{22} \\ m_{21}^2 & -2m_{22}m_{21} & m_{22}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_i \quad \dots(14)$$

[0064] 式(14)は、始点Sにおけるx方向のツイスパラメータ  $\alpha_x$ 、 $\beta_x$ 、 $\gamma_x$  が、それぞれツイスパラメータの輸送行列  $M_{ta}$  によって  $\alpha_{xa}$ 、 $\beta_{xa}$ 、 $\gamma_{xa}$  のように輸送されることを示している。ツイスパラメータの輸送行列  $M_{ta}$  は、式(14)の添え字 a が付された行列である。四極電磁石 6 や四極電磁石 8 の励磁を変化させた輸送行列  $M_{a1}$ 、 $M_{a2}$  を用いると、すなわちツイスパラメータの輸送行列  $M_{ta1}$ 、 $M_{ta2}$  を用いると、x 方向のビームのツイスパラメータ  $\alpha_x$ 、 $\beta_x$ 、 $\gamma_x$  は、式(15)、式(16)のように輸送される。輸送行列  $M_{ta1}$ 、 $M_{ta2}$  は、輸送行列  $M_{ta}$  と同様の形になる。なお、添え字 a 1 は、輸送行列  $M_{a1}$  や輸送行列  $M_{ta1}$  によって輸送された場合のビームプロファイルモニタ 1 1 a における数値であることを示しており、添え字 a 2 は、輸送行列  $M_{a2}$  や輸送行列  $M_{ta2}$  によって輸送された場合のビームプロファイルモニタ 1 1 a における数値であることを示している。

[0065] [数12]

数12

$$\begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_{a1} = M_{ta1} \begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_i \quad \dots(15)$$

[0066]



[数13]

数13

$$\begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_{a2} = M_{ta2} \begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_i \quad \dots(16)$$

[0067] ビームプロファイルモニタ11aにおける輸送行列が、式(11)と同様の各要素を有している場合に、ビームのツイスパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は式(14)のように輸送される。ビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向のビーム径 $r_{xa}$ は、式(17)のように表せる。 $\beta_{xa}$ はビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向のツイスパラメータ $\beta$ であり、 $\eta_{xa}$ はビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向の運動量分散関数である。x方向の運動量分散関数 $\eta_{xa}$ は、式(20)に示すように、始点Sにおけるx方向の運動量分散関数 $\eta_x$ が、輸送行列 $M_a$ によって $\eta_{xa}$ に輸送されたものである。

[0068] [数14]

数14

$$r_{xa} = \sqrt{\varepsilon_x \beta_{xa} + \eta_{xa} \cdot \Delta p / p} \quad \dots(17)$$

[0069] 四極電磁石6や四極電磁石8の励磁を変化させた輸送行列 $M_{a1}$ を用いると、式(17)と同様に、ビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向のビーム径 $r_{xa1}$ は、式(18)のように表せる。また、四極電磁石6や四極電磁石8の励磁を変化させた輸送行列 $M_{a2}$ を用いると、式(17)と同様に、ビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向のビーム径 $r_{xa2}$ は、式(19)のように表せる。 $\beta_{xa1}$ は、輸送行列 $M_{ta1}$ で輸送されたビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向のツイスパラメータ $\beta$ であり、 $\eta_{xa1}$ は、輸送行列 $M_{a1}$ で輸送されたビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向の運動量分散関数である。 $\beta_{xa2}$ は、輸送行列 $M_{ta2}$ で輸送されたビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向のツイスパラメータ $\beta$ であり、 $\eta_{xa2}$ は、輸送行列 $M_{a2}$ で輸送されたビームプロファイルモニタ11aにおけるx方向

の運動量分散関数である。

[0070] [数15]

数15

$$r_{x a 1} = \sqrt{\varepsilon_x \beta_{x a 1}} + \eta_{x a 1} \cdot \Delta p / p \quad \dots (18)$$

[0071] [数16]

数16

$$r_{x a 2} = \sqrt{\varepsilon_x \beta_{x a 2}} + \eta_{x a 2} \cdot \Delta p / p \quad \dots (19)$$

[0072] 式(20)は、始点Sにおけるx方向の運動量分散関数 $\eta_x$ と、そのs方向に対する傾きである $\eta_x'$ が、それぞれ輸送行列 $M_a$ によって $\eta_{x a}$ と $\eta_{x a}'$ に輸送されることを示している。四極電磁石6や四極電磁石8の励磁を変化させた輸送行列 $M_{a 1}$ 、 $M_{a 2}$ を用いると、x方向の運動量分散関数 $\eta_x$ とs方向に対する傾きである $\eta_x'$ は、式(21)、式(22)のように輸送される。

[0073] [数17]

数17

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_a = M_a \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots (20)$$

[0074] [数18]

数18

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_{a 1} = M_{a 1} \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots (21)$$

[0075] [数19]

数19

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_{a 2} = M_{a 2} \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots (22)$$

[0076] 次に、ビームプロファイルモニタ 1 1 b での荷電粒子の光学式について説明する。ビームプロファイルモニタ 1 1 b での荷電粒子の光学式も、ビームプロファイルモニタ 1 1 a での荷電粒子の光学式と同様である。

[0077] [数20]

数20

$$\begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_b = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & -2m_{11}m_{12} & m_{12}^2 \\ -m_{21}m_{11} & 1+2m_{12}m_{21} & -m_{12}m_{22} \\ m_{21}^2 & -2m_{22}m_{21} & m_{22}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_i \quad \dots (23)$$

[0078] 式 (23) は、始点 S における x 方向のツイスパラメータ  $\alpha_x$ 、 $\beta_x$ 、 $\gamma_x$  が、それぞれ輸送行列  $M_{tb}$  によって  $\alpha_{xb}$ 、 $\beta_{xb}$ 、 $\gamma_{xb}$  のように輸送されることを示している。四極電磁石 6 や四極電磁石 8 の励磁を変化させた輸送行列  $M_{a1}$ 、 $M_{a2}$  を用いると、すなわちツイスパラメータの輸送行列  $M_{tb1}$ 、 $M_{tb2}$  を用いると、x 方向のツイスパラメータ  $\alpha_x$ 、 $\beta_x$ 、 $\gamma_x$  は、式 (24)、式 (25) のように輸送される。なお、輸送行列  $M_{tb}$  は、式 (23) の添え字 b が付された行列である。添え字 b 1 は、輸送行列  $M_{b1}$  や輸送行列  $M_{tb1}$  によって輸送された場合のビームプロファイルモニタ 1 1 b における数値であることを示しており、添え字 b 2 は、輸送行列  $M_{b2}$  や輸送行列  $M_{tb2}$  によって輸送された場合のビームプロファイルモニタ 1 1 b における数値であることを示している。

[0079] [数21]

数21

$$\begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_{b1} = M_{tb1} \begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_i \quad \dots (24)$$

[0080] [数22]

数22

$$\begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_{b2} = M_{tb2} \begin{pmatrix} \beta_x \\ \alpha_x \\ \gamma_x \end{pmatrix}_i \quad \dots (25)$$

[0081] ビームプロファイルモニタ 1 1 b における輸送行列  $M_b$  が、式 (1 1) と同様の各要素を有している場合に、ビームのツイスパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は式 (2 3) のように輸送される。ビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向のビーム径  $r_{x b}$  は、式 (2 6) のように表せる。 $\beta_{x b}$  はビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向のツイスパラメータ  $\beta$  であり、 $\eta_{x b}$  はビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向の運動量分散関数である。 $x$  方向の運動量分散関数  $\eta_{x b}$  は、式 (2 9) に示すように、始点 S における  $x$  方向の運動量分散関数  $\eta_x$  が、輸送行列  $M_b$  によって  $\eta_{x b}$  に輸送されたものである。

[0082] [数23]

数23

$$r_{x b} = \sqrt{\varepsilon_x \beta_{x b}} + \eta_{x b} \cdot \Delta p / p \quad \dots(26)$$

[0083] 四極電磁石 6 や四極電磁石 8 の励磁を変化させた輸送行列  $M_{b1}$  を用いると、式 (2 6) と同様に、ビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向のビーム径  $r_{x b1}$  は、式 (2 7) のように表せる。また、四極電磁石 6 や四極電磁石 8 の励磁を変化させた輸送行列  $M_{b2}$  を用いると、式 (2 6) と同様に、ビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向のビーム径  $r_{x b2}$  は、式 (2 8) のように表せる。 $\beta_{x b1}$  は、輸送行列  $M_{t b1}$  で輸送されたビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向のツイスパラメータ  $\beta$  であり、 $\eta_{x b1}$  は、輸送行列  $M_{b1}$  で輸送されたビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向の運動量分散関数である。 $\beta_{x b2}$  は、輸送行列  $M_{t b2}$  で輸送されたビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向のツイスパラメータ  $\beta$  であり、 $\eta_{x b2}$  は、輸送行列  $M_{b2}$  で輸送されたビームプロファイルモニタ 1 1 b における  $x$  方向の運動量分散関数である。

[0084] [数24]

数24

$$r_{x b1} = \sqrt{\varepsilon_x \beta_{x b1}} + \eta_{x b1} \cdot \Delta p / p \quad \dots(27)$$

[0085] [数25]

数25

$$r_{x b 2} = \sqrt{\varepsilon_x \beta_{x b 2}} + \eta_{x b 2} \cdot \Delta p / p \quad \dots(28)$$

[0086] 式(29)は、始点Sにおけるx方向の運動量分散関数 $\eta_x$ と、そのs方向に対する傾きである $\eta_x'$ が、それぞれ輸送行列 $M_b$ によって $\eta_{x b}$ と $\eta_{x b}'$ に輸送されることを示している。四極電磁石6や四極電磁石8の励磁を変化させた輸送行列 $M_{b 1}$ 、 $M_{b 2}$ を用いると、x方向の運動量分散関数 $\eta_x$ とs方向に対する傾きである $\eta_x'$ は、式(30)、式(31)のように輸送される。

[0087] [数26]

数26

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_b = M_b \begin{pmatrix} \eta_i \\ \eta_i' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots(29)$$

[0088] [数27]

数27

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_{b1} = M_{b1} \begin{pmatrix} \eta_i \\ \eta_i' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots(30)$$

[0089] [数28]

数28

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_x' \\ 1 \end{pmatrix}_{b2} = M_{b2} \begin{pmatrix} \eta_i \\ \eta_i' \\ 1 \end{pmatrix}_i \quad \dots(31)$$

[0090] ステップS14にて、上記に示したビームプロファイルモニタ11a、11bでの荷電粒子の光学式と、式(32)から始点Sのツイスパラメータ( $\alpha_{x i}$ ,  $\beta_{x i}$ ,  $\gamma_{x i}$ )運動量分散関数( $\eta_{x i}$ ,  $\eta_{x i}'$ )を算出する。これらの初期条件より、終点Tにおけるビーム径が大きくなる、すなわち、ビームプロファイルモニタ11によるプロファイルデータを検出した際の照射位

置（終点T）におけるビーム径と同一となる光学条件（条件2）の光学パラメータを、光学パラメータ計算装置17で算出する。この条件2を満たす光学パラメータを、光学パラメータ計算装置17に出力する。

[0091] [数29]

数29

$$\beta_i \gamma_i - \alpha_i^2 = 1 \quad \dots (32)$$

[0092] ステップS15にて、再度、機器制御装置16が、電磁石電源15に条件2となる光学パラメータに基づいた電流値を転送し、各電磁石に所定の電流を設定する。

[0093] 各電磁石がステップS15の電流値に設定された場合は、図11、図12に示すように照射位置（終点T）でビーム径が小さくなる。終点Tにおける色収差をほぼゼロにする補正をしない状態では、ビームプロファイルモニタ11bより下流側でもビーム径は円47d、47f、47gのように始点Sのビーム径（円47a）よりも大きくなっている。しかし、終点Tにおける色収差をほぼゼロにする補正をした後には、ビームプロファイルモニタ11bより下流側で、ビーム径は円49dから49gのように始点Sのビーム径（円49a）とほぼ同じであり、照射位置（終点T）でビーム径が補正前よりも小さくなっている。

[0094] 実施の形態2のビーム輸送系4は、ビームの照射位置（終点T）においてビームの色収差をほぼゼロにでき、荷電粒子ビームをRFロックアウト法にて加速器3からビーム出射させる場合に、色収差のためビーム径が大きくなることを抑制でき、照射位置（終点T）において小さな径のビームを得ることができる。

[0095] 実施の形態2のビーム輸送系4は、小型化のシンクロトロンの場合であっても、高性能な偏向電磁石や四極電磁石や六極電磁石を用いて、ビーム輸送系4の光学パラメータ設計の始点Sにおいて色収差をゼロにしなくても、荷電粒子ビーム31の照射位置においてビームの色収差をほぼゼロ（実質的にゼロ）にできる。したがって、実施の形態2のビーム輸送系4は、小型化の

シンクロトロンの場合であっても、加速器やビーム輸送系の大型や複雑化を招くことなく、加速器やビーム輸送系を著しく高額になることを抑制することができる。

[0096] 実施の形態2で示したビーム輸送系4の設計方法は、電粒子ビームをRFノックアウト法にて加速器3からビーム出射させる場合の理想的磁場条件で設定したビーム輸送系において、ビームプロファイルモニタ11で検出されたプロファイルデータを用いてビーム輸送系4の途中のビームの大きさ（ビーム径）を測定することにより、ビーム取り合い点（始点S）における初期条件の一部であるx方向運動量分散関数 $\eta_x$ 、 $\eta_x'$ 及びy方向運動量分散関数 $\eta_y$ 、 $\eta_y'$ を始点運動量分散関数として算出し、プロファイルデータを検出した際の照射位置（終点T）における当初条件である前記条件2と、始点運動量分散関数とを初期条件にして、ビーム輸送系4の新たな光学パラメータを設定するものである。この設計方法を適用することで、設置現場でも調整が容易になり、従来のように何度も調整しなければならないものとは異なり、ビーム輸送系の調整時間を従来に比べて短縮することができる。

[0097] 照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31におけるx方向の色収差をほぼゼロにし、ビームサイズの増大を抑制する場合は、x方向に偏向する偏向電磁石7を1台以上配置し、当該偏向電磁石7の上流にx方向の収束発散を制御する四極電磁石8を2台以上配置する。図11、図12では、偏向電磁石7bと四極電磁石8a、8bが必要最小限の偏向電磁石7及び四極電磁石8である。また、照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31におけるy方向の色収差をほぼゼロにし、ビームサイズの増大を抑制する場合は、y方向に偏向する偏向電磁石7を1台以上配置し、当該偏向電磁石7の上流にy方向の収束発散を制御する四極電磁石8を2台以上配置する。

[0098] 図1、図11、図12では、ビーム輸送系4において、y方向に偏向する偏向電磁石7は記載していないが、例えば偏向電磁石7bより下流側に配置し、このy方向に偏向する偏向電磁石7の上流の四極電磁石8の2台をy方向の収束発散を制御する四極電磁石とすればよい。図1の例では、周回中の

荷電粒子ビーム 3 1 を x 方向に動かしてビーム輸送系 4 に導入するので、始点 S における y 方向の色収差は加速器 3 に配置された偏向電磁石 5 及び四極電磁石 6 により十分小さくすることができる。したがって、始点 S における y 方向の色収差が大きい場合に、照射位置（終点 T）で荷電粒子ビーム 3 1 における y 方向の色収差をほぼゼロにし、ビームサイズの増大を抑制する y 方向用の偏向電磁石 7 及び四極電磁石 8 を配置すればよい。

[0099] 実施の形態 3.

実施の形態 1 及び実施の形態 2 では、照射位置（終点 T）で荷電粒子ビーム 3 1 における x 方向の色収差をほぼゼロにしていた。実施の形態 3 では、照射位置（終点 T）で荷電粒子ビーム 3 1 における x 方向の色収差をほぼゼロにしなくても照射位置（終点 T）で荷電粒子ビーム 3 1 が x 方向に動かないようにするビーム輸送系 4 を説明する。図 1 3 は本発明の実施の形態 3 によるビーム輸送系における補正前のビーム軌道を示す図であり、図 1 4 は本発明の実施の形態 3 によるビーム輸送系における補正後のビーム軌道を示す図である。図 1 3 は、図 4 の偏向電磁石 5 g、7 a を偏向電磁石 5 n、7 c のように傾けて配置し、ステアリング電磁石 1 8 a、1 8 b を追加したものである。図 1 4 は、図 5 の偏向電磁石 5 g、7 a を偏向電磁石 5 n、7 c のように傾けて配置し、ステアリング電磁石 1 8 a、1 8 b を追加したものである。なお、図 1 3、1 4 において、偏向電磁石 5 g、7 a は破線で示した。図 1 3、図 1 4 で斜めに配置された偏向電磁石 5 n、7 c は、設計時の配置からずれた電磁石配置誤差が生じていることを示している。

[0100] 偏向電磁石 5 n、7 c において配置誤差があると、実施の形態 1 のビーム輸送系 4 の設計方法や実施の形態 2 のビーム輸送系 4 の設計方法を適用したビーム輸送系 4 でも、図 1 1 のビーム軌道 2 9 a のようになり、照射位置（終点 T）で荷電粒子ビーム 3 1 がずれた位置にきてしまう。実施の形態 3 では、ステアリング電磁石 1 8 a、1 8 b を追加することで、ビーム輸送系 4 の偏向電磁石の配置誤差を補正でき、図 1 4 のビーム軌道 2 9 b のようにすることができ、照射位置（終点 T）でのビーム位置を、粒子線照射装置 5 8



を動作させない照射位置（アイソセンタ）に正確に合わせることができる。この場合は、照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31におけるx方向の色収差をほぼゼロにできる。なお、ビーム軌道29cは、破線で示した偏向電磁石5g、7aの場合における、補正前のビーム軌道である。ビーム軌道29dは、破線で示した偏向電磁石5g、7aの場合における、補正後のビーム軌道である。

[0101] ビーム輸送系4の偏向電磁石5n、7cに配置誤差があっても、図14のビーム軌道29bのようにすることができるということは、偏向電磁石5n、7cにおいて配置誤差がなく、照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31におけるx方向の色収差が多少大きくても、照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31がx方向に動かないようにできることを示している。したがって、実施の形態3のビーム輸送系4は、照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31におけるx方向の色収差をほぼゼロにしなくても照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31がx方向に動かないようにできるので、照射位置（終点T）で荷電粒子ビーム31におけるx方向の色収差の調整が困難な場合に有効である。

[0102] なお、実施の形態3のビーム輸送系4を適用した粒子線治療装置20は、図1においてステアリング電磁石18a、18bを図11、図12に示した位置に追加される。

[0103] なお、本発明は、その発明の範囲内において、各実施の形態を組み合わせたり、各実施の形態を適宜、変形、省略することが可能である。

### 符号の説明

[0104] 3…加速器、4…ビーム輸送系、7、7a、7b…偏向電磁石、  
8、8a、8b、8c、8d、8e、8f、8g、8h…四極電磁石、  
9…加速空洞、10…x方向キック電極、  
11、11a、11b…ビームプロファイルモニタ、  
14…ビーム解析装置、15…電磁石電源、  
17…光学パラメータ計算装置、

18 a、18 b…ステアリング電磁石、20…粒子線治療装置、  
31…荷電粒子ビーム、45…照射対象、58…粒子線照射装置、  
S…始点（設計始点）、T…終点（照射位置）、  
 $\eta$ 、 $\eta'$ 、 $\eta_x$ 、 $\eta_x'$ 、 $\eta_y$ 、 $\eta_y'$ …運動量分散関数。

## 請求の範囲

[請求項1] 加速器から出射された荷電粒子ビームを照射位置へ輸送するビーム輸送系であって、  
前記荷電粒子ビームを偏向する、少なくとも1つの偏向電磁石と、  
前記荷電粒子ビームを収束または発散させる、少なくとも2つの四極電磁石と、  
前記荷電粒子ビームのプロファイルデータを検出する、少なくとも1つのビームプロファイルモニタと、  
前記プロファイルデータに基づいて、前記ビームプロファイルモニタにおける、ビーム位置の時間変動量またはビーム径であるビーム時間変動関連量を計算するビーム解析装置と、  
前記ビーム輸送系の光学パラメータを計算する光学パラメータ計算装置と、  
前記光学パラメータ計算装置により計算された前記光学パラメータに基づいて、前記偏向電磁石及び前記四極電磁石の励磁電流を設定する電磁石電源と、を備え、  
前記光学パラメータ計算装置は、  
前記ビーム時間変動関連量に基づいて、前記加速器のビーム軌道に設定された前記ビーム輸送系の設計始点における前記荷電粒子ビームの運動量分散関数である始点運動量分散関数を計算し、  
前記始点運動量分散関数と、前記プロファイルデータを検出した際の前記照射位置における当初条件とを初期条件とした前記光学パラメータを計算することを特徴とするビーム輸送系。

[請求項2] 前記加速器はシンクロトロンであり、  
前記加速器に設置された加速空洞に供給する高周波電力がスイープされることにより、前記荷電粒子ビームが前記加速器から出射される場合に、  
前記ビーム解析装置は、前記ビーム時間変動関連量として、前記ビー

ムプロファイルモニタにおける前記ビーム位置の時間変動量を計算することを特徴とする請求項1記載のビーム輸送系。

[請求項3] 前記当初条件は、前記照射位置における前記荷電粒子ビームの運動量分散関数である終点運動量分散関数がゼロであるとの条件を含むことを特徴とする請求項1または2に記載のビーム輸送系。

[請求項4] 前記加速器はシンクロトロンであり、  
前記加速器に設置されたキック電極に高周波電力を供給し、前記荷電粒子ビームの周回面上であって、前記荷電粒子ビームの進行方向に垂直な方向のエミッタンスが大きくされることにより、前記荷電粒子ビームが前記加速器から出射される場合に、  
前記ビーム解析装置は、前記ビーム時間変動関連量として、前記ビームプロファイルモニタにおける前記ビーム径を計算することを特徴とする請求項1記載のビーム輸送系。

[請求項5] 前記当初条件は、前記照射位置における前記荷電粒子ビームの前記ビーム径の設定条件を含むことを特徴とする請求項1または4に記載のビーム輸送系。

[請求項6] 前記偏向電磁石の配置誤差を修正するステアリング電磁石を備えたことを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載のビーム輸送系。

[請求項7] 荷電粒子ビームを加速する加速器と、  
前記加速器から出射された前記荷電粒子ビームを照射位置へ輸送するビーム輸送系と、  
前記ビーム輸送系の下流側に配置され、前記荷電粒子ビームを所望の照射野を形成するように、照射対象に照射する粒子線照射装置と、を備え、  
前記ビーム輸送系は、請求項1乃至6のいずれか1項に記載のビーム輸送系であることを特徴とする粒子線治療装置。

[図1]

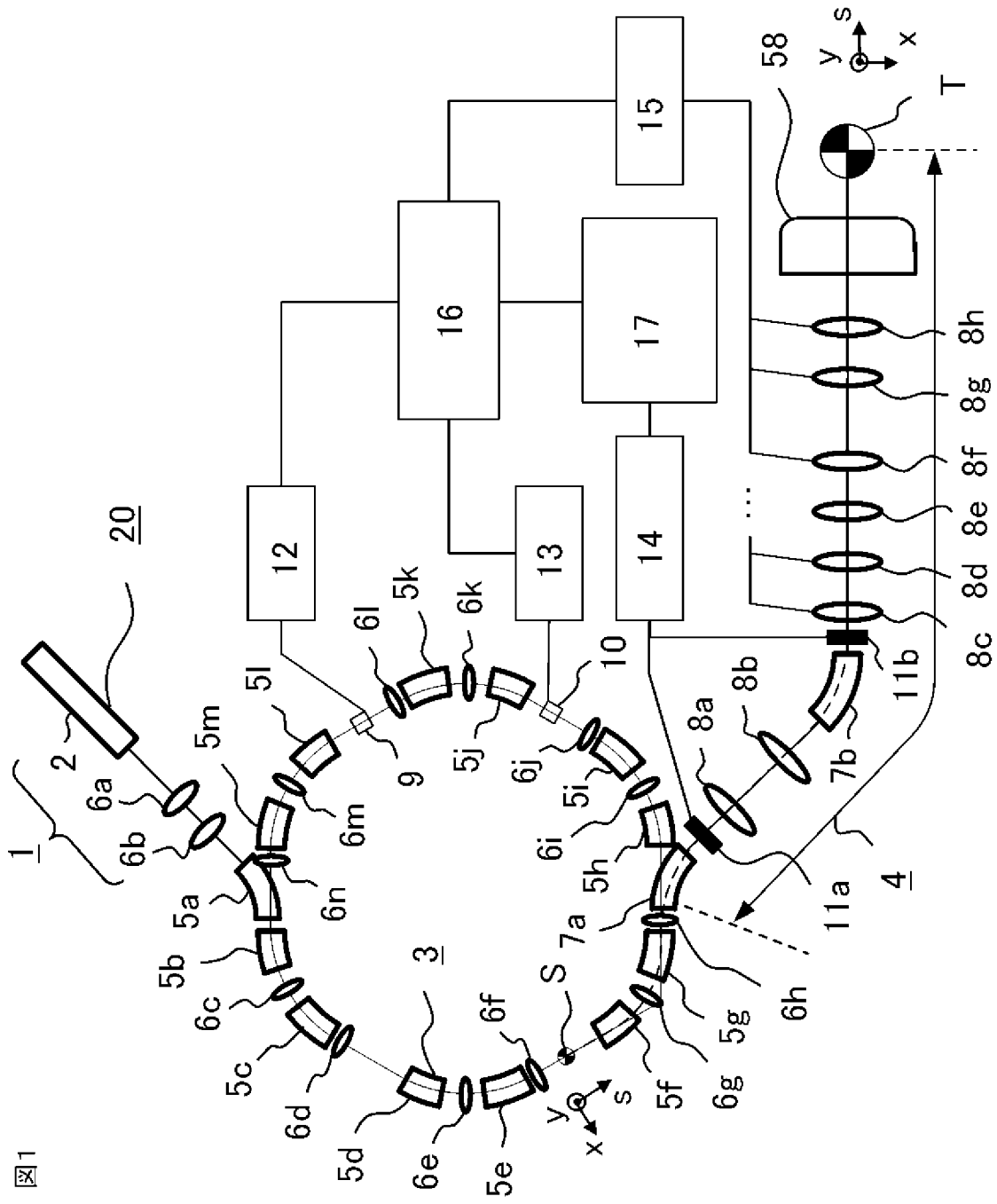
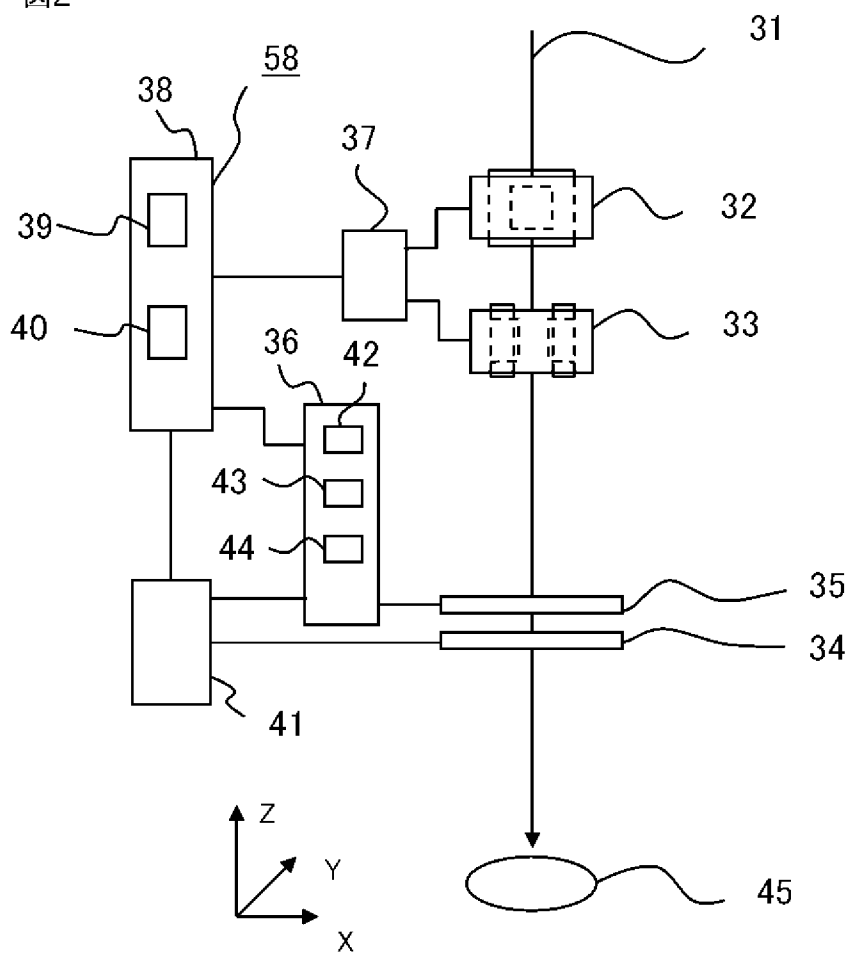


図1

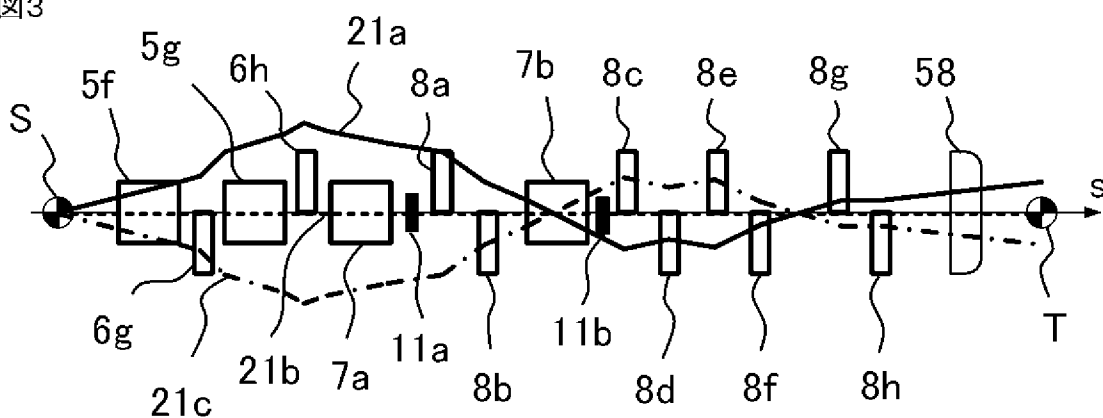
[図2]

図2



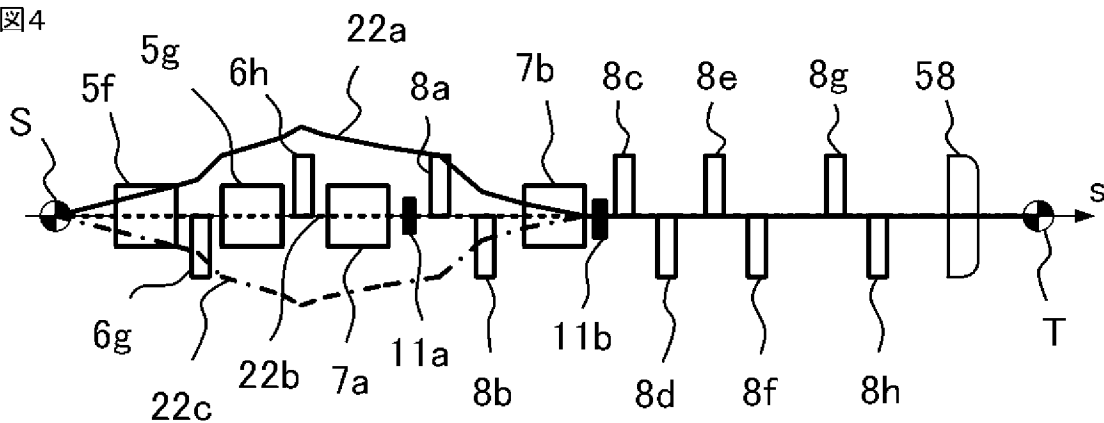
[図3]

図3



[図4]

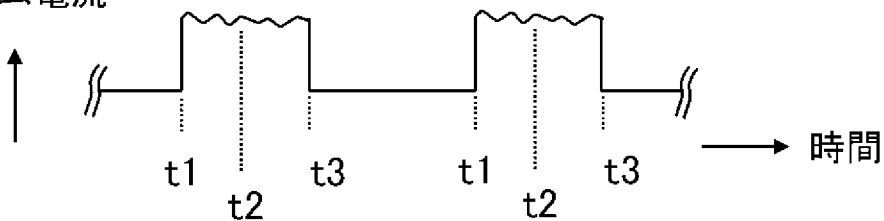
図4



[図5]

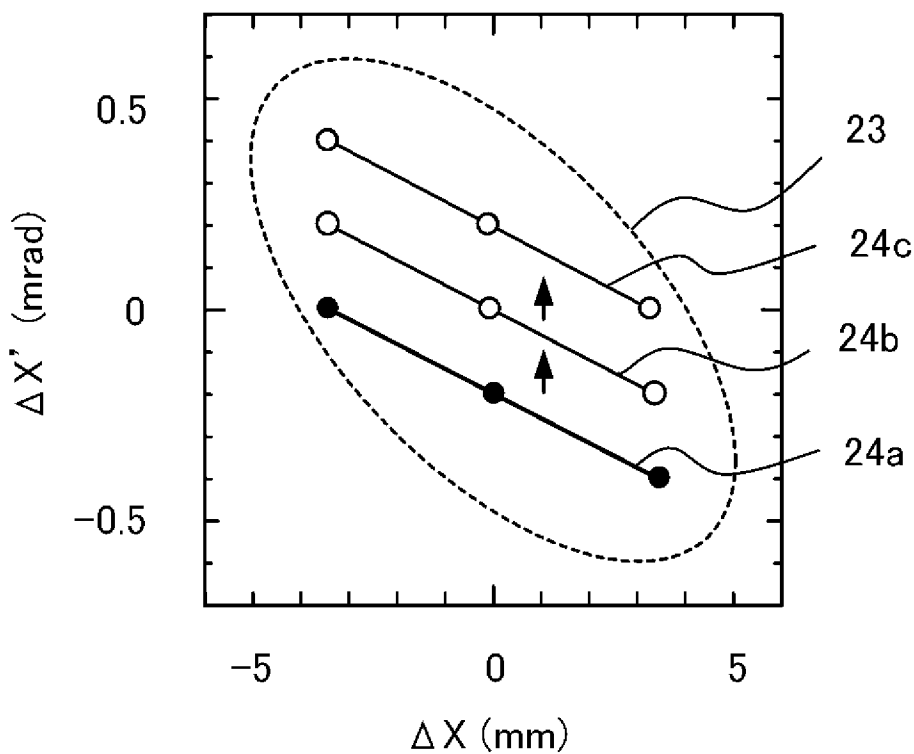
図5

ビーム電流



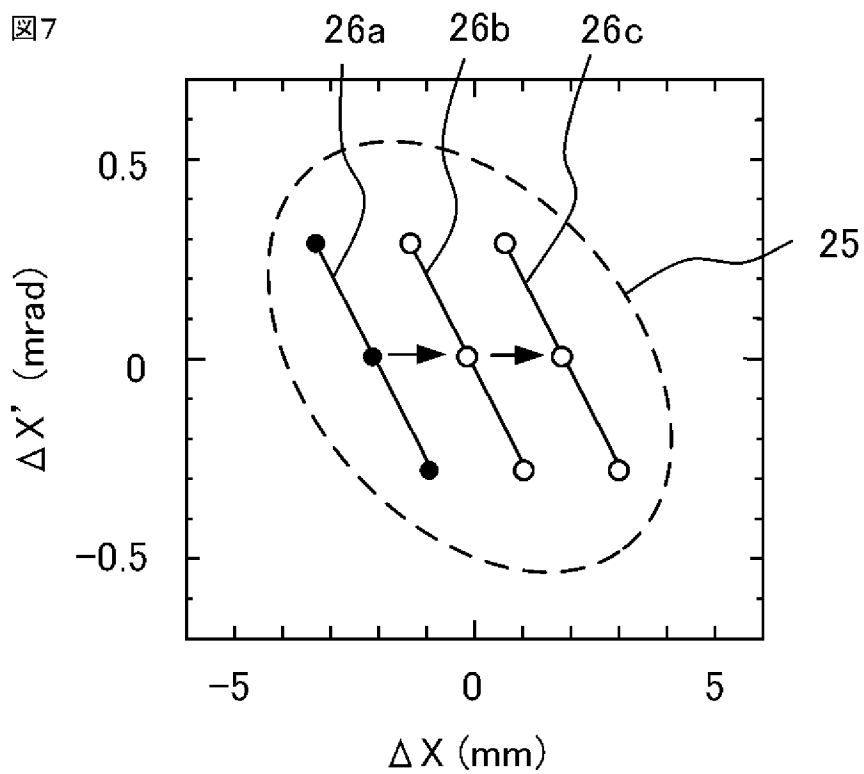
[図6]

図6



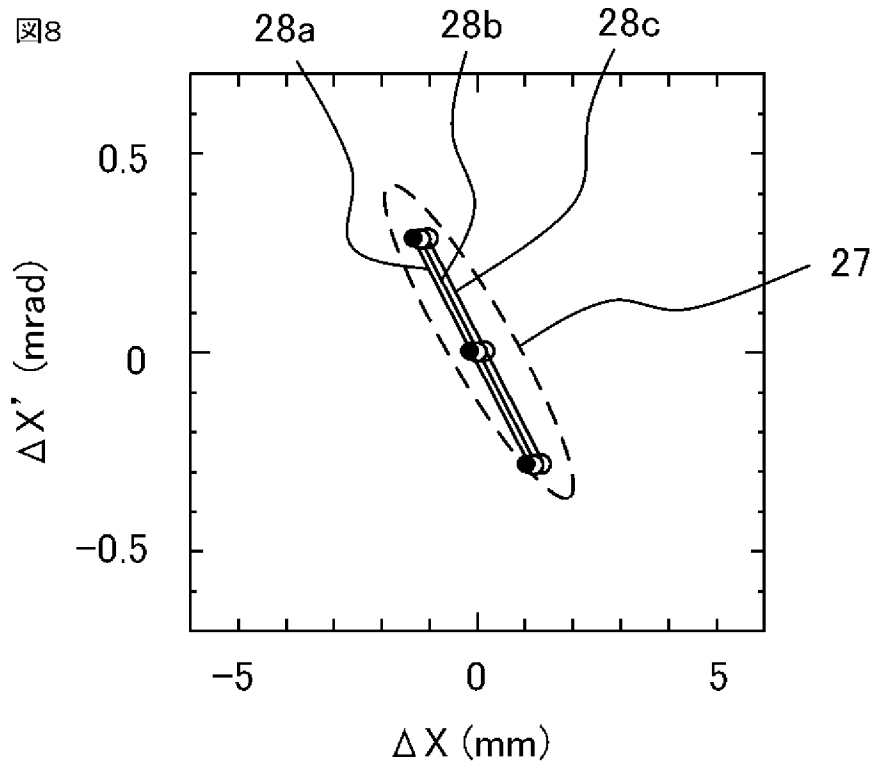
[図7]

図7



[図8]

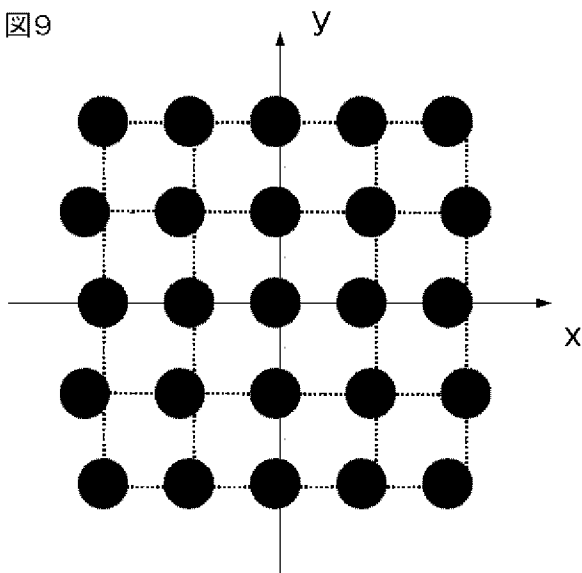
図8





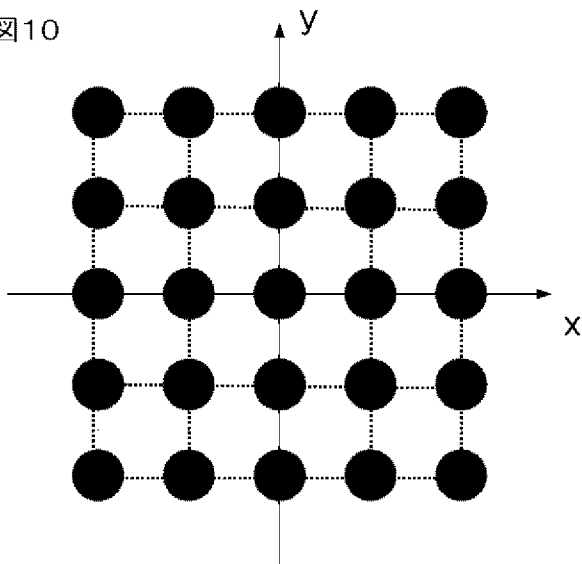
[図9]

図9



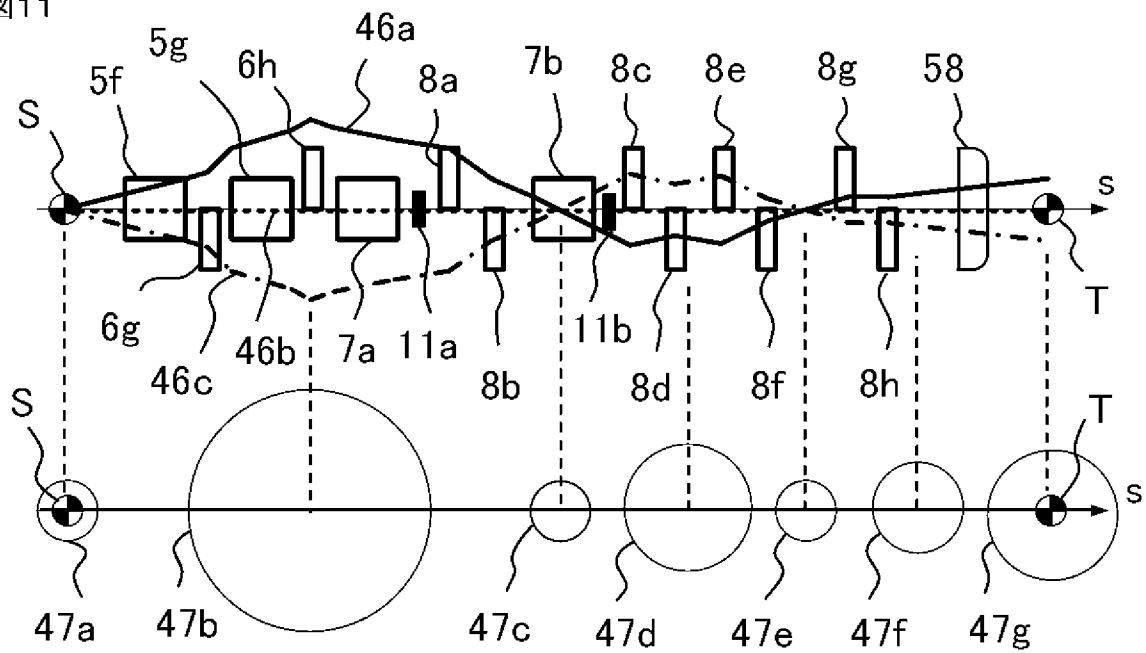
[図10]

図10



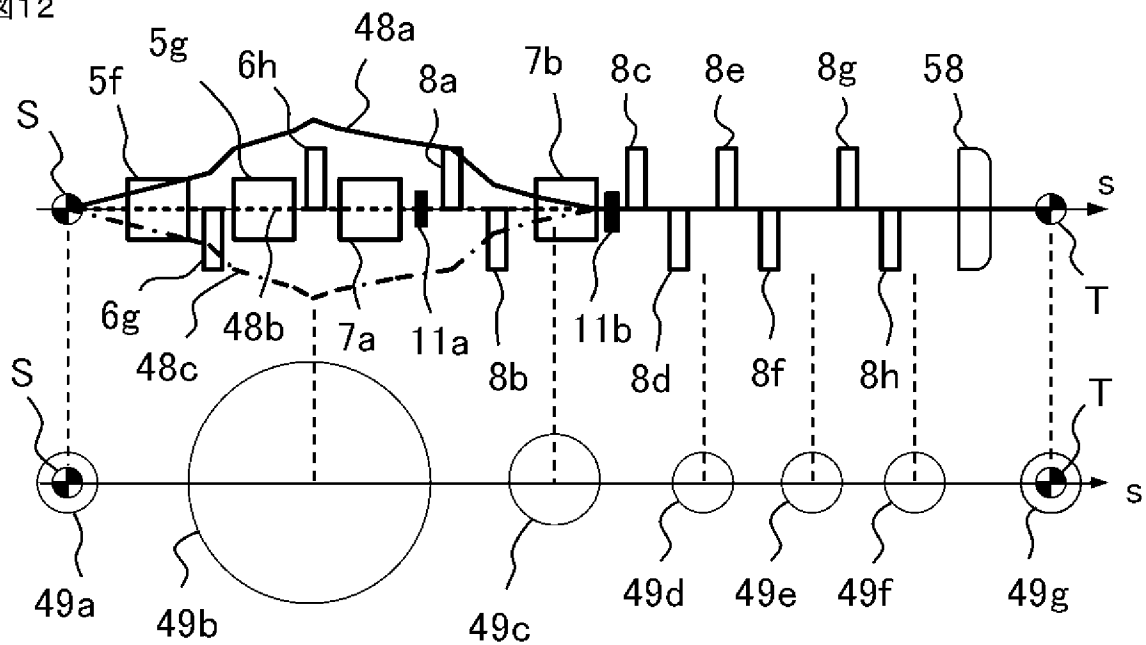
[図11]

図11



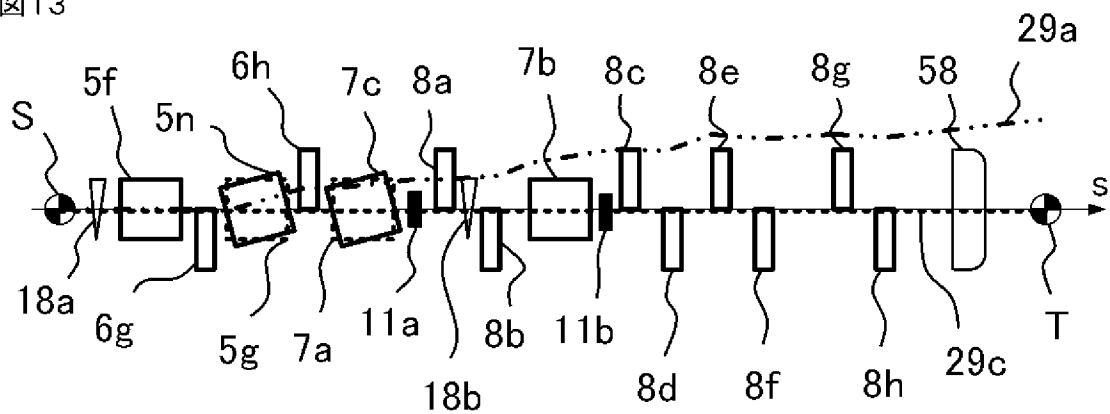
[図12]

図12



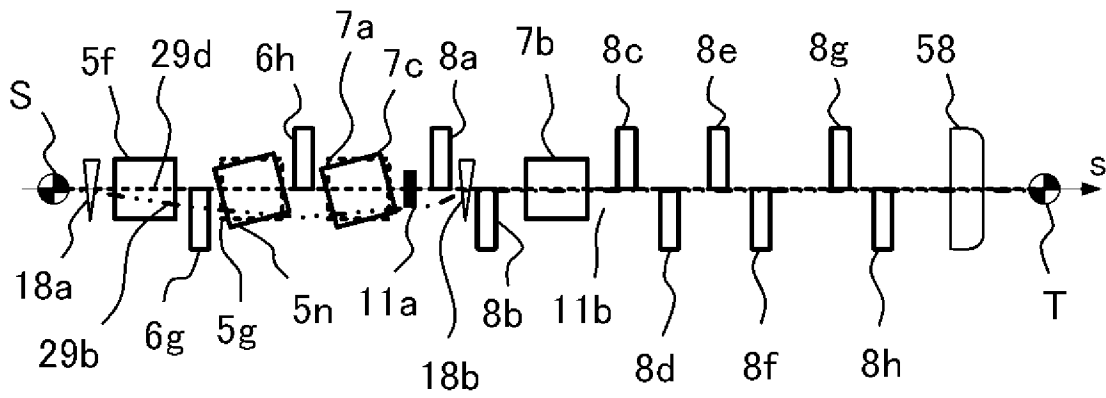
[図13]

図13



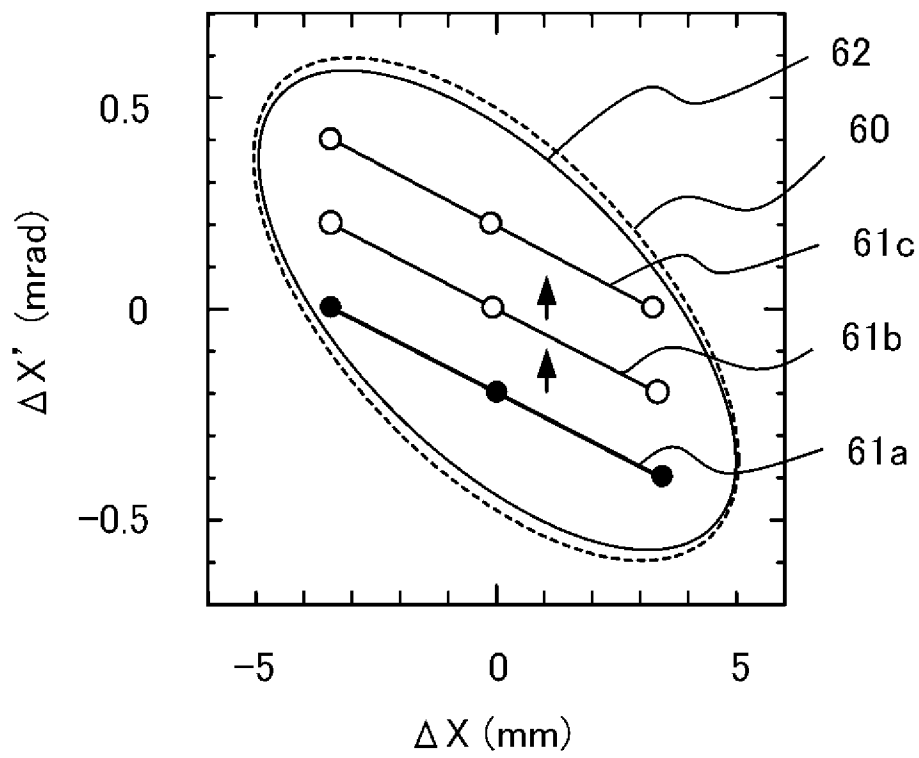
[図14]

図14



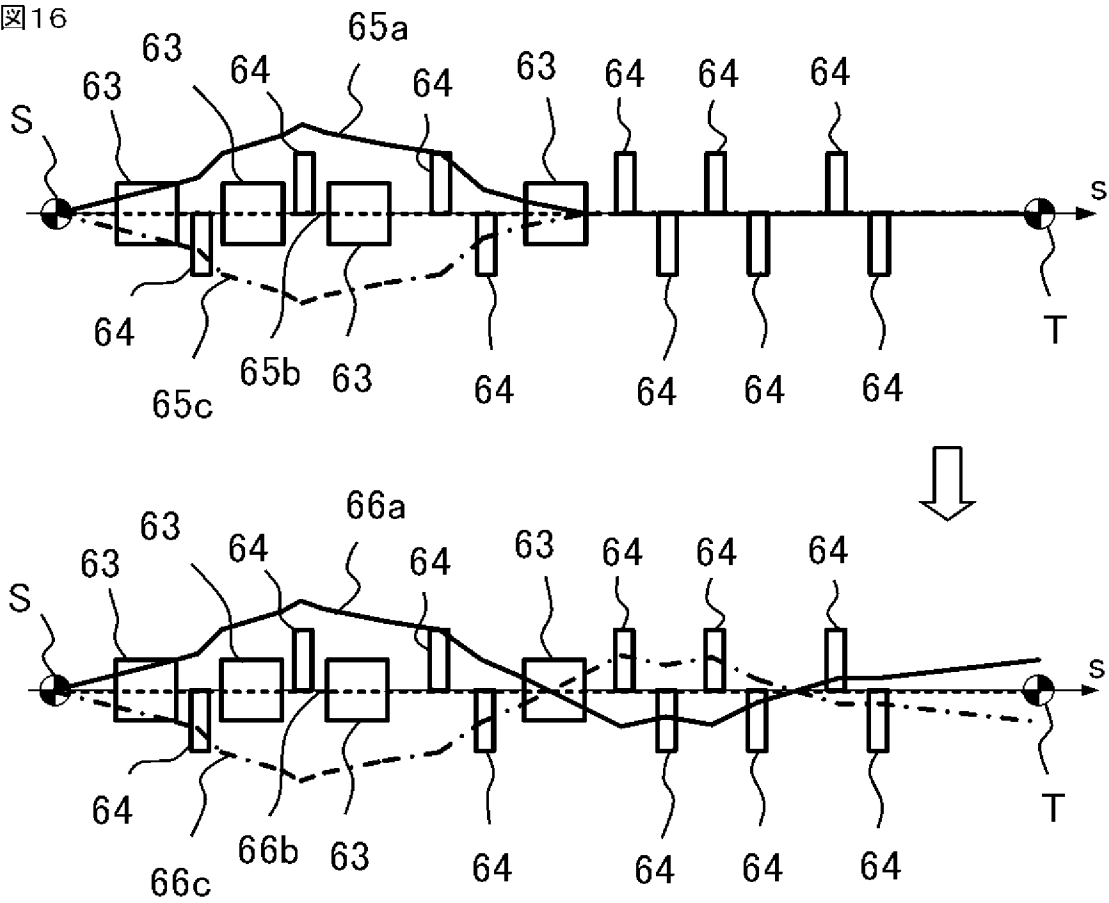
[図15]

図15



[図16]

図16



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2013/068981

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

A61N5/10(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

A61N5/10, G21K1/00, H05H7/00, 13/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4795912 A (Alfred W.MASCHKE), 03 January 1989 (03.01.1989), entire text; all drawings (Family: none)	1-7
A	JP 54-152386 A (Varian Associates, Inc.), 30 November 1979 (30.11.1979), entire text; all drawings & US 4191887 A & GB 2018505 A & CA 1116320 A	1-7
A	WO 2011/053960 A1 (CAMERON, Jhon, M.), 05 May 2011 (05.05.2011), entire text; all drawings & JP 2013-509277 A & US 2011/0101236 A1 & EP 2497101 A & CN 102687230 A	1-7

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
07 October, 2013 (07.10.13)

Date of mailing of the international search report  
15 October, 2013 (15.10.13)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2013/068981

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 7-275381 A (Toshiba Corp.), 24 October 1995 (24.10.1995), entire text; all drawings (Family: none)	1-7
A	JP 11-176596 A (Mitsubishi Electric Corp.), 02 July 1999 (02.07.1999), entire text; all drawings (Family: none)	1-7

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. A61N5/10(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. A61N5/10, G21K1/00, H05H7/00, 13/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2013年
日本国実用新案登録公報	1996-2013年
日本国登録実用新案公報	1994-2013年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	US 4795912 A (Alfred W. MASCHKE) 1989.01.03, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-7
A	JP 54-152386 A (バリアン・アソシエイツ・インコーポレイテッド) 1979.11.30, 全文、全図 & US 4191887 A & GB 2018505 A & CA 1116320 A	1-7

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献  
 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

07.10.2013

国際調査報告の発送日

15.10.2013

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)  
 郵便番号100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

五閑 統一郎

3 I

2 9 0 4

電話番号 03-3581-1101 内線 3346

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2011/053960 A1 (CAMERON, Jhon, M.) 2011. 05. 05, 全文、全図 & JP 2013-509277 A & US 2011/0101236 A1 & EP 2497101 A & CN 102687230 A	1 - 7
A	JP 7-275381 A (株式会社東芝) 1995. 10. 24, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 7
A	JP 11-176596 A (三菱電機株式会社) 1999. 07. 02, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 7