

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6280513号
(P6280513)

(45) 発行日 平成30年2月14日(2018.2.14)

(24) 登録日 平成30年1月26日(2018.1.26)

(51) Int.Cl.

F 1

A 6 1 N 5/10 (2006.01)

A 6 1 N 5/10

H

請求項の数 12 (全 39 頁)

(21) 出願番号 特願2015-62041 (P2015-62041)
 (22) 出願日 平成27年3月25日(2015.3.25)
 (65) 公開番号 特開2016-179115 (P2016-179115A)
 (43) 公開日 平成28年10月13日(2016.10.13)
 審査請求日 平成29年2月3日(2017.2.3)

(73) 特許権者 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
 (74) 代理人 110000350
 ポレール特許業務法人
 (72) 発明者 遠竹 聡
 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 梅澤 真澄
 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 櫻島 広明
 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】 粒子線照射システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

イオンビームを加速する加速器と、

前記加速器から前記イオンビームが出射される第1ビーム経路及び前記第1ビーム経路に沿って配置される第1ステアリング電磁石及び第2ステアリング電磁石を有する第1ビーム輸送系と、

回転ガントリーと、

前記回転ガントリーに取り付けられ、前記第1ビーム経路に連絡される第2ビーム経路及び前記第2ビーム経路に沿って配置される第3ステアリング電磁石及び第4ステアリング電磁石を有する第2ビーム輸送系と、

前記回転ガントリーに取り付けられ、前記第2ビーム経路に連絡される照射装置と、

前記第1および第2ステアリング電磁石よりも下流で前記第1ビーム経路に沿って相互間に間隔を置いて配置される第1及び第2ビーム位置測定装置と、

前記照射装置内で前記照射装置の中心軸に沿って相互間に間隔を置いて配置される第3及び第4ビーム位置測定装置と、

前記第3及び第4ビーム位置測定装置で測定される各ビーム位置に基づいて前記第1ステアリング電磁石に対する第1励磁電流及び前記第2ステアリング電磁石に対する第2励磁電流をそれぞれ算出する第1励磁電流演算装置とを備えたことを特徴とする粒子線照射システム。

【請求項 2】

10

20

前記算出される第 1 及び第 2 励磁電流を用いて、記憶装置に格納されている、前記第 1 及び第 2 ステアリング電磁石のそれぞれに対する励磁電流を更新する励磁電流更新装置を備えた請求項 1 に記載の粒子線照射システム。

【請求項 3】

前記回転ガントリーの設定回転角度ごとの、前記第 3 ステアリング電磁石に対する第 5 励磁電流及び前記第 4 ステアリング電磁石に対する第 6 励磁電流の各情報を含む回転角度テーブル情報、前記回転ガントリーの一つの回転角度における、前記第 1 ステアリング電磁石に対する第 3 励磁電流及び前記第 2 ステアリング電磁石に対する第 4 励磁電流の各情報、及び前記第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置によって測定される各々の前記ビーム位置の情報を格納する記憶装置と、

10

前記記憶装置に格納されている前記第 3 励磁電流の情報を前記第 1 励磁電流の情報に更新し、前記記憶装置に格納されている前記第 4 励磁電流の情報を前記第 2 励磁電流の情報に更新する励磁電流更新装置を備えた請求項 1 に記載の粒子線照射システム。

【請求項 4】

前記回転ガントリーの一つの設定回転角度において前記第 1 及び第 2 ビーム位置測定装置で測定される各ビーム位置に基づいて前記第 1 ステアリング電磁石に対する第 3 励磁電流及び前記第 2 ステアリング電磁石に対する第 4 励磁電流をそれぞれ算出し、前記回転ガントリーの複数の設定回転角度において前記第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置で測定される各ビーム位置に基づいて、前記第 3 ステアリング電磁石に対する第 5 励磁電流及び前記第 4 ステアリング電磁石に対する第 6 励磁電流を前記設定回転角度ごとにそれぞれ算出する第 2 励磁電流演算装置とを備える請求項 1 に記載の粒子線照射システム。

20

【請求項 5】

前記設定回転角度ごとに、前記設定回転角度ごとの前記第 5 励磁電流及び前記第 6 励磁電流を含む回転角度テーブル情報を作成するテーブル作成装置と、

前記設定回転角度ごとの前記回転角度テーブル情報、前記回転ガントリーの一つの回転角度における、前記第 1 ステアリング電磁石に対する第 3 励磁電流及び前記第 2 ステアリング電磁石に対する第 4 励磁電流の各情報、及び前記第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置によって測定される各々の前記ビーム位置の情報を格納する記憶装置とを備えた請求項 4 に記載の粒子線照射システム。

【請求項 6】

30

前記記憶装置に格納されている前記第 3 励磁電流の情報を前記第 1 励磁電流の情報に更新し、前記記憶装置に格納されている前記第 4 励磁電流の情報を前記第 2 励磁電流の情報に更新する励磁電流更新装置を備えた請求項 5 に記載の粒子線照射システム。

【請求項 7】

イオンビーム走査装置を有する前記照射装置と、

前記イオンビーム走査装置を制御する走査制御装置と、

前記第 1 励磁電流及び前記第 2 励磁電流を、前記加速器から出射される前記イオンビームの設定エネルギーごとに算出する前記第 1 励磁電流演算装置とを備えた請求項 1 に記載の粒子線照射システム。

【請求項 8】

40

ビーム照射対象への前記イオンビームの照射後におけるビーム軌道の調整が選択される
とき、前記回転ガントリーを基準回転角度まで回転させる回転制御装置への第 1 制御指令、
前記第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置のそれぞれによる前記ビーム位置の測定を、前記
イオンビームの所定のエネルギーの範囲において設定エネルギーごとに繰り返して実施さ
せる第 2 制御指令、及び前記第 1 励磁電流演算装置による前記第 1 及び第 2 励磁電流の算
出を実行させる第 3 制御指令を、前記第 1 制御指令、前記第 2 制御指令及び前記第 3 制御
指令の順に出力する第 1 軌道調整制御装置を備えた請求項 1 に記載の粒子線照射システム
。

【請求項 9】

前記回転ガントリーの一つの設定回転角度において前記第 1 及び第 2 ビーム位置測定装

50

置で測定される各ビーム位置に基づいて前記第 1 ステアリング電磁石に対する第 3 励磁電流及び前記第 2 ステアリング電磁石に対する第 4 励磁電流をそれぞれ算出し、前記回転ガントリーの複数の設定回転角度において前記第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置で測定される各ビーム位置に基づいて、前記第 3 ステアリング電磁石に対する第 5 励磁電流及び前記第 4 ステアリング電磁石に対する第 6 励磁電流を前記設定回転角度ごとにそれぞれ算出する第 2 励磁電流演算装置と、

前記粒子線照射システムの試運転の期間におけるビーム軌道の調整が選択されるとき、前記第 2 励磁電流演算装置による前記第 3 及び第 4 励磁電流のそれぞれの算出を一つの設定エネルギーにおいて実施させる第 4 制御指令、及び前記回転ガントリーの回転範囲内の前記設定回転角度ごとに前記第 2 励磁電流演算装置による前記第 5 及び第 6 励磁電流のそれぞれの算出を実施させる第 5 制御指令を、前記第 4 制御指令及び前記第 5 制御指令の順に、複数の前記設定エネルギーを含む前記イオンビームの所定のエネルギーの範囲内の前記設定エネルギーごとに出力する第 2 軌道調整制御装置と、

10

ビーム照射対象への前記イオンビームの照射後におけるビーム軌道の調整が選択されるとき、前記回転ガントリーを基準回転角度まで回転させる回転制御装置への第 1 制御指令、前記第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置のそれぞれによる前記ビーム位置の測定を、前記イオンビームの所定のエネルギーの範囲において前記設定エネルギーごとに繰り返して実施させる第 2 制御指令、及び前記第 1 励磁電流演算装置による前記第 1 及び第 2 励磁電流の算出を実行させる第 3 制御指令を、前記第 1 制御指令、前記第 2 制御指令及び前記第 3 制御指令の順に出力する第 1 軌道調整制御装置とを備えた請求項 1 または 2 に記載の粒子線照射システム。

20

【請求項 10】

前記加速器がシンクロトロン加速器及びサイクロトロン加速器のいずれかである請求項 1 に記載の粒子線照射システム。

【請求項 11】

照射制御装置と、

前記照射制御装置からの第 1 制御指令に基づいて前記回転ガントリーを回転させて前記照射装置の前記中心軸をビーム照射対象に対する前記イオンビームの照射方向に設定するガントリー制御装置と、

前記照射制御装置からの第 2 制御指令に基づいて、前記第 1 ステアリング電磁石に供給する励磁電流を前記第 1 励磁電流に調節し、前記第 2 ステアリング電磁石に供給する励磁電流を前記第 2 励磁電流に調節するステアリング電磁石制御装置とを有する請求項 1 に記載の粒子線照射システム。

30

【請求項 12】

照射制御装置と、

前記照射制御装置からの第 1 制御指令に基づいて前記回転ガントリーを回転させて前記照射装置の前記中心軸をビーム照射対象に対する前記イオンビームの照射方向に設定するガントリー制御装置と、

前記照射制御装置からの第 2 制御指令に基づいて、前記第 1 ステアリング電磁石に供給する励磁電流を前記第 1 励磁電流に調節し、前記第 2 ステアリング電磁石に供給する励磁電流を前記第 2 励磁電流に調節し、前記第 3 ステアリング電磁石に供給する励磁電流を前記第 5 励磁電流に調節し、前記第 4 ステアリング電磁石に供給する励磁電流を前記第 6 励磁電流に調節するステアリング電磁石制御装置とを有する請求項 3 に記載の粒子線照射システム。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、粒子線照射システムに係り、特に、がんの治療に適用するのに好適な粒子線照射システムに関する。

【背景技術】

50

【 0 0 0 2 】

粒子線照射システムは、大きく分けて、加速器としてシンクロトロンを有する粒子線照射システム（例えば、特開 2 0 0 4 - 3 5 8 2 3 7 号公報参照）、及び加速器としてサイクロトロンを有する粒子線照射システム（例えば、特開 2 0 1 1 - 9 2 4 2 4 号公報参照）が知られている。

【 0 0 0 3 】

シンクロトロンを有する粒子線照射システムは、イオン源、直線加速器、シンクロトロン、高エネルギービーム輸送系（以下、H E B T 系という）、ガントリービーム輸送系（以下、G A B T 系という）、回転ガントリー及び照射装置を備える。直線加速器を経てシンクロトロンで設定エネルギーまで加速された陽子イオンビーム（または炭素イオンビーム）が、H E B T 系に出射され、G A B T 系を経て回転ガントリーに取り付けられた照射装置に達する。陽子イオンビーム（以下、イオンビームという）は、照射装置から治療台に横たわっている患者のがんの患部に照射される。

10

【 0 0 0 4 】

また、サイクロトロンを有する粒子線照射システムは、イオン源、サイクロトロン、H E B T 系、G A B T 系、回転ガントリー及び照射装置を備える。サイクロトロンを有する粒子線照射システムにおける H E B T 系、G A B T 系、回転ガントリー及び照射装置は、実質的に、シンクロトロンを有する粒子線照射システムにおけるこれらの構造と同じである。サイクロトロンで加速されて出射されたイオンビームは、H E B T 系及び G A B T 系を通過して照射装置から患部に照射される。

20

【 0 0 0 5 】

がんの患部へのイオンビームの主な照射方法として、散乱体法及びビーム走査法がある。散乱体法及びビーム走査法のそれぞれは、シンクロトロンを有する粒子線照射システム及びサイクロトロンを有する粒子線照射システムに適用される。散乱体法では、照射装置に設置された散乱体を用いて、イオンビームを照射装置の中心軸に垂直な方向に拡大させ、コリメータによって患部の断面形状に合わせて切り出したイオンビームを患部に照射する。ビーム走査法では、イオンビームを、照射装置に設置された走査電磁石によって、患部の形状に合わせてイオンビームを照射装置の中心軸に垂直な方向に走査し、このイオンビームを患部に照射する。

【 0 0 0 6 】

30

ビーム走査法を採用する荷電粒子ビーム照射システムの例が、特開平 1 0 - 1 1 8 2 0 4 号公報、特開 2 0 0 4 - 3 5 8 2 3 7 号公報及び特開 2 0 1 1 - 1 7 7 3 7 4 号公報に記載されている。これらの公開公報は、イオンビームの照射方向において複数に分割されたがんの患部の各層に対して、細いイオンビームをその照射方向と直交する方向に走査することにより層内における複数の照射位置でイオンビームを照射するビーム走査方法を記載している。層内で隣の照射位置へのイオンビームの移動は、イオンビームの位置を変更する走査電磁石を走査制御装置により制御することにより行われる。また、深い層から浅い層（または浅い層から深い層）へのイオンビームの移動は、加速器またはデグレダによりイオンビームのエネルギーを変えることによって行われる。イオンビームのエネルギーが増大するほど、イオンビームのブラッグピークが人体の深い位置まで到達する。

40

【 0 0 0 7 】

シンクロトロンを有する粒子線照射システム及びサイクロトロンを有する粒子線照射システムでは、イオンビームを患部に精度良く照射するために、加速器から H E B T 系に出射されたイオンビームが照射装置の中心軸を通過するように、H E B T 系及び G A B T 系におけるビーム軌道を調整する必要がある。このビーム軌道の調整は、粒子線照射システムの据え付けが完了した後の粒子線照射システムの試運転の期間において行われる。

【 0 0 0 8 】

ビーム軌道の調整の一例が、特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報に記載されている。このビーム軌道の調整の一例では、ステアリング電磁石制御装置が、H E B T 系に設けられたビーム位置モニタで測定されたビーム位置に基づいて H E B T 系に設けられたステアリング電

50

磁石に供給する励磁電流を調節し、さらに、照射装置に設けられたビーム位置モニタのビーム位置検出信号に基づいてG A B T系に設けられたステアリング電磁石に供給する励磁電流を調節する。H E B T系のステアリング電磁石への励磁電流の制御により、H E B T系内のビーム軌道を、回転ガントリーにより回転されるG A B T系の入口の設定位置（例えば、中心の位置）に合わせることができる。

【0009】

また、ステアリング電磁石制御装置による、G A B T系のステアリング電磁石への励磁電流の制御により、イオンビームが照射装置の中心軸を通過するように、G A B T系におけるビーム軌道が調整される。このビーム軌道の調整は、回転ガントリーの所定の回転角度ごとに行われる。

10

【0010】

特開2011-5096号公報は、加速器から出射されたイオンビームを用いた患部の治療を開始した後において実施するビーム軌道の調整について記載する。イオンビームによる患部の治療を開始した後、粒子線治療システムを据え付けている建屋の変動により、粒子線治療システムの各機器の設置状態も徐々に変化し、ビーム軌道も徐々に変化する。このような治療開始後におけるビーム軌道の変化を補正するために、患者へのイオンビームの照射前に、照射装置に設けられたビーム位置モニタで測定されたビーム位置に基づいてG A B T系に設けられた各ステアリング電磁石の励磁電流を補正する。

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【0011】

【特許文献1】特開2004-358237号公報

【特許文献2】特開2011-92424号公報

【特許文献3】特開平10-118204号公報

【特許文献4】特開2011-177374号公報

【特許文献5】特許第4299269号公報

【特許文献6】特開2011-5096号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

30

粒子線治療システムの据え付け後の試運転の期間において特許第4299269号公報に記載するビーム軌道の調整を行った場合でも、イオンビームを患部に照射する治療開始から時間が経過すると、前述のように、このビーム軌道が試運転の期間において調整されたビーム軌道からずれてしまう。イオンビームの患部への精度良く照射するためにも、イオンビームによる治療開始後においてもビーム軌道の調整が必要になる。

【0013】

特開2011-5096号公報では、前述したように、イオンビームを用いた治療を開始した後でビーム軌道の調整を行っている。しかしながら、このビーム軌道の調整は、照射装置に設けられたビーム位置モニタで測定されたビーム位置に基づいてG A B T系のステアリング電磁石の励磁電流を調節することによって行われる。

40

【0014】

特開平10-118204号公報及び特開2004-358237号公報に記載されたビーム走査法では、前述したように患部の層ごとに照射するイオンビームのエネルギーを変える必要がある。このため、ビーム走査法を実現できる粒子線照射システムでは、粒子線照射システムの試運転の期間におけるビーム軌道の調整は、照射するイオンビームのエネルギー範囲においてイオンビームのエネルギーごとに行う必要があり、試運転期間とはいえ、ビーム軌道の調整に長時間を有する。

【0015】

治療開始後における粒子線照射システムのビーム軌道の調整は、粒子線照射システムによる患部へのイオンビームの照射を停止する期間が長期に亘るのを避けるためにも、短時

50

間で行うことが望まれる。

【 0 0 1 6 】

本発明の目的は、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間を短縮することができる粒子線照射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】

【 0 0 1 7 】

上記した目的を達成する本発明の特徴は、

前記加速器から前記イオンビームが出射される第 1 ビーム経路及び第 1 ビーム経路に沿って配置される第 1 ステアリング電磁石及び第 2 ステアリング電磁石を有する第 1 ビーム輸送系と、

回転ガントリーと、

回転ガントリーに取り付けられ、第 1 ビーム経路に連絡される第 2 ビーム経路及びこの第 2 ビーム経路に沿って配置される第 3 ステアリング電磁石及び第 4 ステアリング電磁石を有する第 2 ビーム輸送系と、

回転ガントリーに取り付けられ、第 2 ビーム経路に連絡される照射装置と、

第 1 および第 2 ステアリング電磁石よりも下流で第 1 ビーム経路に沿って相互間に間隔を置いて配置される第 1 及び第 2 ビーム位置測定装置と、

照射装置内で相互間に間隔を置いて配置される第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置と、

第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置で測定される各ビーム位置に基づいて第 1 ステアリング電磁石に対する第 1 励磁電流及び第 2 ステアリング電磁石に対する第 2 励磁電流をそれぞれ算出する励磁電流演算装置とを備えたことにある。

【 0 0 1 8 】

照射装置内に配置された第 3 及び第 4 ビーム位置測定装置で測定される各ビーム位置に基づいて第 1 ステアリング電磁石に対する第 1 励磁電流及び第 2 ステアリング電磁石に対する第 2 励磁電流をそれぞれ算出する励磁電流演算装置を備えているため、イオンビームを用いた治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間を短縮することができる。

【発明の効果】

【 0 0 1 9 】

本発明によれば、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間を短縮することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 0 】

【図 1】本発明の好適な一実施例である実施例 1 の粒子線照射システムの構成図である。

【図 2】図 1 に示された回転ガントリーの拡大縦断面図である。

【図 3】図 2 の III - III 矢視図である。

【図 4 A】図 1 に示された制御システムに含まれる、加速器・ビーム輸送系制御装置、ガントリー制御装置及び走査制御装置の詳細構成図である。

【図 4 B】図 1 に示された制御システムに含まれる中央制御装置の詳細構成図である。

【図 5】図 1 に示された粒子線照射システムにおいて試運転の期間に実施されるビーム軌道調整の手順の一部を示すフローチャートである。

【図 6】図 1 に示された粒子線照射システムにおいて試運転の期間に実施されるビーム軌道調整の手順の残りの部分を示すフローチャートである。

【図 7】図 1 に示された粒子線照射システムにおいて治療開始後に実施されるビーム軌道調整の手順を示すフローチャートである。

【図 8】粒子線照射システムの試運転の期間に実施されたビーム軌道調整によって得られたデータの一例であって回転ガントリーの各角度に対するステアリング電磁石の励磁電流を示す説明図である。

【図 9】試運転の期間に実施されたビーム軌道調整によって得られたデータの一例であって各エネルギーに対する照射装置のビーム位置モニタの位置でのビーム位置を示す説明図である。

10

20

30

40

50

【図 1 0】図 1 に示された粒子線照射システムを用いたイオンビーム照射方法における手順を示すフローチャートである。

【図 1 1】図 1 に示された粒子線照射システムにおいて試運転の期間に実施される、H E B T 系と G A B T 系の取り合い部に対するビーム軌道の調整を示す説明図である。

【図 1 2】図 1 に示された粒子線照射システムにおいて試運転の期間に実施される、G A B T 系におけるビーム軌道の調整を示す説明図である。

【図 1 3】図 1 に示された粒子線照射システムにおいて治療開始後に実施される、H E B T 系と G A B T 系の取り合い部に対するビーム軌道の調整を示す説明図である。

【図 1 4】本発明の好適な他の実施例である実施例 2 の粒子線照射システムの構成図である。

10

【図 1 5】図 1 4 に示された制御システムに含まれる、加速器・ビーム輸送系制御装置、ガントリー制御装置及び走査制御装置の詳細構成図である。

【図 1 6】図 1 4 に示された制御システムに含まれる中央制御装置の詳細構成図である。

【図 1 7】図 1 4 に示された粒子線照射システムにおいて試運転の期間に実施されるビーム軌道調整の手順の、図 6 に対応する残りの部分を示すフローチャートである。

【図 1 8】図 1 4 に示された粒子線照射システムにおいて治療開始後に実施されるビーム軌道調整の手順を示すフローチャートである。

【図 1 9】本発明の他の好適な実施例である実施例 3 の粒子線照射システムの構成図である。

【図 2 0】図 1 9 に示された制御システムに含まれる、加速器・ビーム輸送系制御装置、ガントリー制御装置及び走査制御装置の詳細構成図である。

20

【図 2 1】図 1 9 に示された粒子線照射システムにおいて試運転の期間に実施されるビーム軌道調整の手順の一部を示すフローチャートである。

【図 2 2】図 1 9 に示された粒子線照射システムにおいて治療開始後に実施されるビーム軌道調整の手順を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0 0 2 1】

粒子線照射システムの据え付け後の試運転の期間において特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報に記載されたように、H E B T 系と G A B T 系の取り合い部に対するビーム軌道の調整及び G A B T 系におけるビーム軌道の調整を実施したとしても、粒子線照射システムを用いたイオンビームによる患者の患部の治療が開始されて時間が経過すると、照射装置の中心軸に垂直な平面においてイオンビームがこの中心軸からずれる。このため、治療開始後においても、粒子線照射システムにおいてビーム軌道の調整が必要になる。

30

【0 0 2 2】

粒子線照射システムは、概略、図 1 1 に示すように、加速器（例えば、シンクロトロン加速器及びサイクロトロン加速器のいずれか）に接続される、H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6、G A B T 系 2 0 のビーム経路 2 1 及びビーム経路 2 1 に接続される照射装置 2 9 を有する。G A B T 系 2 0 及び照射装置 2 9 は、回転ガントリー（図示せず）に設置されている。ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 及びビーム位置モニタ H P 1 及び H P 2 がビーム経路 1 6 に沿って配置される。3 5 は、H E B T 系 1 5 と G A B T 系 2 0 の取り合い部である。

40

【0 0 2 3】

発明者らは、粒子線照射システムによる患部の治療を開始した後においてイオンビームが照射装置の中心軸からずれた場合でも、ビーム軌道の調整を精度良く行うことができる粒子線照射システムを実現するために種々の検討を行った。

【0 0 2 4】

発明者らは、その検討において、患者の治療開始後照射装置 2 9 の中心軸に垂直な平面においてイオンビームがこの中心軸からずれる原因が、粒子線照射システムを据え付けている建屋の、竣工後の時間経過によるゆがみ等によって H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 が変形することにあることを突き止めた。この H E B T 系のビーム経路 1 6 の変形は、目

50

に見えるほどではなく実際には極めて僅かである。

【 0 0 2 5 】

また、発明者らは、回転ガントリー自体は剛性が高くその支持構造が強固であるため、上記した建屋のゆがみ等の影響を受け難く、回転ガントリーに取り付けられた G A B T 系 2 0 及び照射装置 2 9 では上記したゆがみ等に基づいた変形が生じないということも新たに見出した。G A B T 系 2 0 及び照射装置 2 9 は建屋のゆがみ等による変形が生じないため、発明者らは、建屋のゆがみ等により H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 に変形が生じたときには、取り付け部 3 5 において H E B T 系 1 5 の出口の中心の位置と G A B T 系 2 0 の入口の中心の位置のずれが生じるだけであることを見出した。H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 に変形により、ビーム経路 1 6 内を通過するイオンビームが G A B T 系 2 0 の入口の中心の位置を通過しなくなる。このため、このイオンビームは、照射装置 2 9 内で、照射装置 2 9 の中心軸に垂直な平面においてこの中心軸からずれてしまう。

10

【 0 0 2 6 】

上記の新たに見出した知見を考慮して検討した結果、発明者らは、以下に記載するように、イオンビームの照射による患者への治療を開始後に、建屋のゆがみ等により H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 に変形が生じた場合においてもビーム軌道の調整を精度良く行うことができる粒子線照射システムを実現できることを見出した。また、治療開始後におけるビーム軌道の調整であるため、ビーム軌道の調整に要する時間を短縮することが望まれる。このような粒子線照射システムを実現するためには、治療を開始した後におけるビーム軌道の調整では、照射装置のビーム位置モニタで測定されたビーム位置を用いて、特開 2 0 1 1 - 5 0 9 6 号公報に記載されたように G A B T 系のステアリング電磁石に供給する励磁電流（励磁量）を調節するのではなく、H E B T 系のステアリング電磁石に供給する励磁電流を調節すればよいのである。

20

【 0 0 2 7 】

H E B T 系と G A B T 系の取り付け部に対するビーム軌道の調整を説明する前に、H E B T 系の構成についてもう少し具体的に説明する。ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 は、特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報に記載されるように、それぞれ一対のステアリング電磁石を有する。ステアリング電磁石 H H 1 は、一対のステアリング電磁石として、ビーム経路 1 6 に垂直な平面内で水平方向（X 方向）におけるイオンビームの位置を調節する X 方向ステアリング電磁石、及びその垂直な平面内で水平方向と直交する方向（Y 方向）におけるイオンビームの位置を調節する Y 方向ステアリング電磁石を有する。ステアリング電磁石 H H 2 も、同様に、一対のステアリング電磁石である X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石を有する。ビーム位置モニタ H P 1 及び H P 2 のそれぞれも、特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報に記載されるように、一対のビーム位置モニタである、X 方向におけるイオンビームの位置を測定する X 方向ビーム位置モニタ及び Y 方向におけるイオンビームの位置を測定する Y 方向ビーム位置モニタを有する。

30

【 0 0 2 8 】

粒子線照射システムの据え付け後において粒子線照射システムの試運転の期間において実施される、H E B T 系と G A B T 系の取り付け部 3 5 に対するビーム軌道の調整が実施され、さらに、G A B T 系におけるビーム軌道の調整が実施される。

40

【 0 0 2 9 】

図 1 1 を用いて、その試運転の期間において実施される取り付け部 3 5 に対するビーム軌道の調整を説明する。試運転の期間において、イオンビームが加速器からビーム経路 1 6 に出射される。ビーム経路 1 6 に出射されたイオンビームの X 方向及び Y 方向のそれぞれにおけるビーム位置が、回転ガントリーが任意の或る回転角度まで回転されている状態で、ビーム位置モニタ H P 1 及び H P 2 のそれぞれによって測定される。ビーム位置モニタ H P 1 及び H P 2 がそれぞれ配置された位置で測定されたそれらのビーム位置に基づいて、X 方向におけるビーム軌道の勾配及び Y 方向におけるビーム軌道の勾配を求め、さらに、これらの勾配、及びビーム位置モニタ H P 1 が配置された位置での X 方向及び Y 方向におけるそれぞれのビーム位置に基づいて、取り付け部 3 5 におけるビーム経路 2 1 の入

50

口でのイオンビームの通過位置を求める。

【 0 0 3 0 】

ビーム経路 2 1 の入口でのイオンビームの通過位置がビーム経路 2 1 の入口での設定位置からずれているとき、このずれを補償してビーム経路 2 1 の入口でのイオンビームの通過位置を設定位置（例えば、ビーム経路 2 1 の入口の中心位置）に一致させる、ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれに含まれる X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流を算出する。これらのステアリング電磁石に対してそれぞれ算出された上記の励磁電流は、回転ガントリーの前述の任意の或る回転角度での値である。

【 0 0 3 1 】

なお、取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整はイオンビームの設定されたエネルギーごとに実施され、前述の任意の或る回転角度における、設定された各エネルギーに対してステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石に供給される各励磁電流が算出される。このようにして、H E B T 系と G A B T 系の取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整が終了する。

【 0 0 3 2 】

上記した取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整後に、上記の試運転の期間において、G A B T 系におけるビーム軌道の調整が実施される。この G A B T 系におけるビーム軌道の調整を、図 1 2 を用いて説明する。

【 0 0 3 3 】

図 1 1 には図示していないが、粒子線照射システムは、図 1 2 に示すように、ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 を G A B T 系 2 0 のビーム経路 2 1 に沿って配置しており、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M を照射装置 2 9 に設置している。ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれも、一对のステアリング電磁石を有する。ステアリング電磁石 G H 1 は、一对のステアリング電磁石である、ビーム経路 2 1 に垂直な平面内で水平方向（X 方向）におけるイオンビームの位置を調節する X 方向ステアリング電磁石、及びその垂直な平面内で水平方向と直交する方向（Y 方向）におけるイオンビームの位置を調節する Y 方向ステアリング電磁石を有する。ステアリング電磁石 G H 2 も、同様に、一对のステアリング電磁石である X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石を有する。前述したビーム経路 2 1 に垂直な平面内での X 方向及びこの X 方向と直交する Y 方向のそれぞれは、回転ガントリーの回転角度が 0 ° のときにおける方向である。

【 0 0 3 4 】

また、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれも、特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報に記載されるように、一对のビーム位置モニタである、X 方向におけるイオンビームの位置を測定する X 方向ビーム位置モニタ及び Y 方向におけるイオンビームの位置を測定する Y 方向ビーム位置モニタを有する。なお、照射装置 2 9 における X 方向及び Y 方向は照射装置 2 9 の中心軸に垂直な平面内での方向である。照射装置 2 9 内でのその X 方向は前述したビーム経路 1 6 及び 2 1 のそれぞれに垂直な各平面内における水平方向（X 方向）に対応し、照射装置 2 9 内でのその Y 方向は前述したビーム経路 1 6 及び 2 1 のそれぞれに垂直な各平面内における水平方向と直交する方向（Y 方向）に対応している。

【 0 0 3 5 】

加速器から出射されたイオンビームは、ビーム経路 1 6 及び 2 1 を通って照射装置 2 9 に達する。照射装置 2 9 に取り付けられたビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれは、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれが配置された各位置においてイオンビームの X 方向及び Y 方向のそれぞれにおけるビーム位置を測定する。これらの測定されたビーム位置に基づいて、照射装置 2 9 内での X 方向及び Y 方向におけるビーム軌道のそれぞれの勾配を上記した取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整と同様に求める。X 方向及び Y 方向におけるビーム軌道のそれぞれの勾配が 0 でなく、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれが配置された各位置で X 方向及び Y 方向における、照射装置 2 9 の中心軸からの変位が 0 でないとき、各勾配及び各変位がそれぞれ 0 になる、ステアリング電

10

20

30

40

50

磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれに含まれる X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流を算出する。

【 0 0 3 6 】

なお、G A B T 系におけるビーム軌道の調整は、イオンビームの設定されたエネルギーごとに回転ガントリーの設定された回転角度ごとに実施され、設定された各エネルギーに対して設定された回転角度ごとにステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石に供給される各励磁電流が算出される。このようにして、G A B T 系におけるビーム軌道の調整が終了する。

【 0 0 3 7 】

試運転時における取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整及び G A B T 系におけるビーム軌道の調整が実施された後、基準回転角度におけるステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の各励磁電流、基準回転角度におけるビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれの位置での X 方向及び Y 方向の各ビーム位置、及び設定された回転ガントリーの回転角度ごとの、ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の各励磁電流のそれぞれの情報が、回転角度テーブルとして、イオンビームの設定されたエネルギーごとに、前述の記憶装置に格納される。

【 0 0 3 8 】

以上に述べた試運転の期間におけるビーム軌道の調整が終了した後、粒子線照射システムを用いた、患者の患部へのイオンビームの照射が行われ、患部の治療が実施される。患者への治療が開始されてから所定の時間が経過したとき、イオンビームの、照射装置 2 9 の中心軸からのずれを補償するために、粒子線照射システムにおいてビーム軌道の調整が行われる。

【 0 0 3 9 】

粒子線照射システムを用いた患者の治療が開始された後におけるビーム軌道の調整を、図 1 3 を用いて説明する。このビーム軌道の調整において、加速器から出射されたイオンビームがビーム経路 1 6 及び 2 1 を通って照射装置 2 9 に達し、照射装置 2 9 内でのイオンビームの位置がビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれによって測定される。このとき、回転ガントリーは前述の任意の或る回転角度まで回転されている。これらのビーム位置モニタで測定されたそれぞれのビーム位置に基づいて求めた、照射装置 2 9 内での X 方向及び Y 方向におけるビーム軌道のそれぞれの勾配が 0 でなく、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれが配置された各位置で X 方向及び Y 方向における、イオンビームの、照射装置 2 9 の中心軸からの変位が 0 でないとき、各勾配及び各変位がそれぞれ 0 になる、ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流を算出する。

【 0 0 4 0 】

なお、治療開始後におけるビーム軌道の調整はイオンビームの設定されたエネルギーごとに実施され、基準回転角度で設定されたエネルギーごとにステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石に供給される各励磁電流が算出される。このようにして、治療開始後におけるビーム軌道の調整が終了する。

【 0 0 4 1 】

ビーム位置モニタ P R M 及び S P M で測定されそれぞれのビーム位置を用いて H E B T 系 1 5 に配置されたステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの励磁電流を算出するので、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間を短縮することができる。

【 0 0 4 2 】

以上に述べた検討結果を反映した本発明の各実施例を以下に説明する。

【実施例 1】

【 0 0 4 3 】

本発明の好適な一実施例である実施例 1 の粒子線照射システムを、図 1 ~ 図 4 を用いて

10

20

30

40

50

以下に説明する。

【 0 0 4 4 】

本実施例の粒子線照射システム 1 は、建屋（図示せず）内に配置されて建屋の床面に設置される。この粒子線照射システム 1 は、図 1 に示すように、イオンビーム発生装置 2、高エネルギービーム輸送系（H E B T 系）1 5、ガントリービーム輸送系（G A B T 系）2 0、回転ガントリー 2 6、照射装置 2 9 及び制御システム 5 9 を備えている。粒子線照射システム 1 では、がんの患部（ビーム照射対象）に照射するイオンビームとして、陽子イオンビームが用いられる。陽子イオンビームの替りに炭素イオンビームを用いてもよい。

【 0 0 4 5 】

イオンビーム発生装置 2 は、イオン源（図示せず）、前段加速器である直線加速器 1 4 及びシンクロトロン加速器 3 を有する。シンクロトロン加速器 1 3 は、イオンビームの周回軌道を構成する環状のビームダクト 4、入射器 5、イオンビームに高周波電圧を印加する高周波加速空洞（高周波加速装置）8、複数の偏向電磁石 6、複数の四極電磁石 7、出射用の高周波印加装置 9、出射用のセプタム電磁石 1 3 を有する。ビームダクト 4 に連絡される入射器 5 は、真空ダクトにより直線加速器 1 4 に接続される。イオン源も直線加速器 1 4 に接続される。高周波印加装置 9 は、出射用高周波電極 1 0、高周波電源 1 1 及び開閉スイッチ 1 2 を含んでいる。出射用高周波電極 1 0 は、環状のビームダクト 4 に取り付けられ、そして、開閉スイッチ 1 2 を介して高周波電源 1 1 に接続される。各偏向電磁石 6、各四極電磁石 7、高周波加速空洞 8 及びセプタム電磁石 1 3 は、図 1 に示すように、ビームダクト 4 に沿って配置されている。

【 0 0 4 6 】

図 4 A に示すように、各偏向電磁石 6、各四極電磁石 7 及びセプタム電磁石 1 3 が別々の電源 5 5 に接続される。高周波加速空洞 8 が高周波電源装置 5 7 に接続される。

【 0 0 4 7 】

H E B T 系（第 1 ビーム輸送系）1 5 は、シンクロトロン加速器 1 3 のセプタム電磁石 1 3 に接続されるビーム経路（ビームダクト）1 6 を有しており、このビーム経路 1 6 に沿って、シンクロトロン加速器 3 から照射装置 2 9 に向かって複数の 4 極電磁石 1 8、偏向電磁石 1 7、複数の 4 極電磁石 1 9、ステアリング電磁石 H H 1（第 1 ステアリング電磁石）、ステアリング電磁石 H H 2（第 2 ステアリング電磁石）、ビーム位置モニタ H P 1（第 1 ビーム位置測定装置）及びビーム位置モニタ H P 2（第 2 ビーム位置測定装置）を配置して構成される。4 極電磁石 1 9 は、ステアリング電磁石 H H 1 とステアリング電磁石 H H 2 の間にも配置される。ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 は、前述したように、X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石をそれぞれ有する。偏向電磁石 1 7 及び四極電磁石 1 8、1 9 が、図 4 A に示されるように、別々の電源 5 6 に接続される。さらに、ステアリング電磁石 H H 1 が電源 5 8 A に、ステアリング電磁石 H H 2 が電源 5 8 B にそれぞれ接続される。ビーム位置モニタ H P 1 及び H P 2 のそれぞれは、ステアリング電磁石 H H 2 よりも H E B T 系 1 5 と G A B T 2 0 系の取り合い部 3 5 側に配置される。

【 0 0 4 8 】

G A B T 系（第 2 ビーム輸送系）2 0 は、ビーム経路（ビームダクト）2 1 を有しており、このビーム経路 2 1 に沿って、シンクロトロン加速器 3 から照射装置 2 9 に向かって偏向電磁石 2 2、複数の 4 極電磁石 2 5、ステアリング電磁石 G H 1（第 3 ステアリング電磁石）、ステアリング電磁石 G H 2（第 4 ステアリング電磁石）、及び偏向電磁石 2 3 及び 2 4 を配置して構成される。4 極電磁石 2 5 は、ステアリング電磁石 H H 1 とステアリング電磁石 H H 2 の間にも配置される。ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 も、前述したように、X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石をそれぞれ有する。ビーム経路 2 1 は回転ガントリー 2 6 に設置されており、偏向電磁石 2 2 ~ 2 5、複数の 4 極電磁石 2 5、及びステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 も回転ガントリー 2 6 に設置されている。ビーム経路 2 1 は、取り合い部 3 5 においてビーム経路 1 6 に連絡される

。ビーム経路 2 1 は回転ガントリー 2 6 によって回転されるため、ビーム経路 2 1 はビーム経路 1 6 に直接接続されてはいない。偏向電磁石 2 2 ~ 2 4 及び四極電磁石 2 5 が、図 4 A に示されるように、別々の電源 5 6 に接続される。さらに、ステアリング電磁石 G H 1 が電源 5 8 C に、ステアリング電磁石 G H 2 が電源 5 8 D にそれぞれ接続される。

【 0 0 4 9 】

照射装置 2 9 は、2 つの走査電磁石（イオンビーム走査装置）3 0 及び 3 1、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M、及び線量モニタ 3 2 を備える。照射装置 2 9 は、回転ガントリー 2 6 に取り付けられ、偏向電磁石 2 4 の下流に配置される。走査電磁石 3 0 及び 3 1、ビーム位置モニタ P R M（第 3 ビーム位置測定装置）、ビーム位置モニタ S P M（第 4 ビーム位置測定装置）及び線量モニタ 3 2 は、この順に、照射装置 2 9 のケーシング（図示せず）内において偏向電磁石 2 4 から照射装置 2 9 の出口に向かって照射装置 2 9 の中心軸に沿って配置される。走査電磁石 3 0 はイオンビームを照射装置 2 9 の中心軸に垂直な平面内において偏向させて X 方向に走査し、走査電磁石 3 1 はイオンビームをその平面内において偏向させて X 方向と直交する Y 方向に走査する。患者 3 4 が横たわる治療台 3 3 が、照射装置 2 9 に対向するように配置される。

10

【 0 0 5 0 】

制御システム 5 9 は、中央制御装置 6 0、加速器・輸送系制御装置 6 4、ガントリー制御装置 7 3、走査制御装置 7 6 及びデータベース 8 1 を有する（図 1 参照）。中央制御装置 6 0 は、中央演算装置（C P U）6 1 及び C P U 6 1 に接続されたメモリ 6 2 を有する。C P U 6 1 は照射制御装置 9 3、ビーム軌道調整装置 9 4（第 2 ビーム軌道調整装置）及びビーム軌道調整装置 9 8（第 1 ビーム軌道調整装置）を含んでいる（図 1 参照）。加速器・輸送系制御装置 6 4、ガントリー制御装置 7 3 及び走査制御装置 7 6 は、C P U 6 1 の照射制御装置 9 3、ビーム軌道調整装置 9 4 及びビーム軌道調整装置 9 8 にそれぞれ接続される。データベース 8 1 は照射制御装置 9 3 に接続される。粒子線照射システム 1 は治療計画装置 8 2 を有し、治療計画装置 8 2 はデータベース 8 1 に接続される。

20

【 0 0 5 1 】

ビーム軌道調整装置 9 4 は、図 4 B に示すように、軌道調整制御装置 9 5（第 2 軌道調整制御装置）、励磁電流演算装置 6 3（第 2 励磁電流演算装置）及びテーブル作成装置 9 6 を有する。ビーム軌道調整装置 9 7 は、図 4 B に示すように、軌道調整制御装置 9 8（第 1 軌道調整制御装置）、励磁電流演算装置 7 0（第 1 励磁電流演算装置）及び励磁電流更新装置 9 9 を有する。照射制御装置 9 3、軌道調整制御装置 9 5 及び 9 8、励磁電流演算装置 6 3 及び 7 0、テーブル作成装置 9 6 及び励磁電流更新装置 9 9 は、メモリ 6 2 に接続される。入力装置 1 0 0 が、照射制御装置 9 3、軌道調整制御装置 9 5 及び 9 8 に接続される（図 4 B 参照）。

30

【 0 0 5 2 】

ビーム軌道調整装置 9 4 によって、粒子線照射システム 1 の据え付け後の試運転の期間におけるビーム軌道の調整が実施される。ビーム軌道調整装置 9 7 によって、粒子線照射システム 1 による患部の治療が開始された後におけるビーム軌道の調整が実施される。照射制御装置 9 3 によって、治療時においてビーム照射対象である患部にイオンビームを照射する制御が実施される。

40

【 0 0 5 3 】

加速器・輸送系制御装置 6 4 は、図 4 A に示すように、電磁石制御装置 6 5、高周波電圧制御装置 6 6、出射制御装置 6 7、ビーム位置入力装置 6 8、ステアリング電磁石制御装置 6 9、エネルギー判定装置 7 1 及びメモリ 7 2 を有する。ガントリー制御装置 7 3 は、図 4 A に示すように、回転制御装置 7 4、回転角度判定装置 7 5 及び回転角度設定装置 5 2 を有する。また、走査制御装置 7 6 は、図 4 A に示すように、照射位置制御装置 7 7、線量判定装置 7 8、層判定装置 7 9 及びメモリ 8 0 を有する。

【 0 0 5 4 】

照射制御装置 9 3、ビーム軌道調整装置 9 4 及びビーム軌道調整装置 9 8 と加速器・輸送系制御装置 6 4、ガントリー制御装置 7 3 及び走査制御装置 7 6 との具体的な接続状態

50

を、図 4 A 及び図 4 B を用いて以下に説明する。照射制御装置 9 3 は、電磁石制御装置 6 5、高周波電圧制御装置 6 6、出射制御装置 6 7、ステアリング電磁石制御装置 6 9、メモリ 7 2、回転制御装置 7 4、照射位置制御装置 7 7、線量判定装置 7 8、層判定装置 7 9 及びメモリ 8 0 に、それぞれ、接続される。軌道調整制御装置 9 5 は、電磁石制御装置 6 5、高周波電圧制御装置 6 6、出射制御装置 6 7、ビーム位置入力装置 6 8、ステアリング電磁石制御装置 6 9、エネルギー判定装置 7 1、メモリ 7 2、回転制御装置 7 4、回転角度判定装置 7 5 及び回転角度設定装置 5 2 に、それぞれ、接続される。軌道調整制御装置 9 8 は、電磁石制御装置 6 5、高周波電圧制御装置 6 6、出射制御装置 6 7、ビーム位置入力装置 6 8、ステアリング電磁石制御装置 6 9、エネルギー判定装置 7 1、メモリ 7 2 及び回転制御装置 7 4 に、それぞれ、接続される。ビーム位置入力装置 6 8 は、ビーム位置モニタ H P 1 , H P 2 , P R M 及び S P M に接続される。角度検出器 2 8 (図 2 参照) が回転角度判定装置 7 5 に接続される。照射位置制御装置 7 7 が、電磁石制御装置 6 5、高周波電圧制御装置 6 6、出射制御装置 6 7 及びステアリング電磁石制御装置 6 9 に接続される。線量判定装置 7 8 が出射制御装置 6 7 に接続される。線量モニタ 3 2 が線量判定装置 7 8 に接続される。

【 0 0 5 5 】

回転ガントリー 2 6 を、図 2 及び図 3 を用いて説明する。回転ガントリー 2 6 は、3 6 0 ° の範囲で回転が可能であり、リング状のフロントリング 3 7 及びリアリング 3 8 を有する円筒状の回転胴 3 6 を備える。フロントリング 3 7 が建屋の床面 4 3 に設置された支持装置 3 9 A によって支持され、リアリング 3 8 がその床面 4 3 に設置された支持装置 3 9 B によって支持される。支持装置 3 9 A は、ロール支持部材 4 0 及び複数のサポートローラ 4 1 A を含む。複数のサポートローラ 4 1 A は、ロール支持部材 4 0 に回転可能に取り付けられる。フロントリング 3 7 はこれらのサポートローラ 4 1 A で支持される。支持装置 3 9 B も、支持装置 3 9 A と同様に、ロール支持部材 4 0 (図示せず) 及び複数のサポートローラ 4 1 B を含む。複数のサポートローラ 4 1 B は、ロール支持部材 4 0 に回転可能に取り付けられる。リアリング 3 8 はこれらのサポートローラ 4 1 B で支持される。回転ガントリー 2 6 を回転させる回転装置 (例えば、モータ) 4 2 が、リアリング 3 8 を支持する複数のサポートローラ 4 1 B のうちの一つのサポートローラ 4 1 B の回転軸に連結される。回転ガントリー 2 6 の回転角度を測定する角度検出器 2 8 が、フロントリング 3 7 を支持する複数のサポートローラ 4 1 A のうちの一つのサポートローラ 4 1 A の回転軸に連結される。なお、図 1 では、角度検出器 2 8 がビーム経路 2 1 に接触するように図示されているが、これは角度検出器 2 8 の配置を模式的に表したものである。

【 0 0 5 6 】

回転胴 3 6 の内面に取り付けられた複数の支持部材 4 8 によって支持された治療室 4 5 が回転胴 3 6 内に設けられる。治療室 4 5 のフロントリング 3 7 側は開放されており、治療室 4 5 のリアリング 3 8 側は隔壁 4 7 によって封鎖されている。照射装置 2 9 は、回転胴 3 6 に取り付けられて回転胴 3 6 の中心に向かって伸びており、治療室 4 5 内の治療ケージ 4 9 に達している。照射装置 2 9 に接続された、G A B T 系 2 0 のビーム経路 2 1 は、図 2 に示すように、リアリング 3 8 側に向かって伸びており、回転ガントリー 2 6 の外側に位置する取り合い部 3 5 において H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 に連絡される。なお、回転ガントリー 2 6 の中心線 2 7 (図 1 及び図 2 参照) は、回転ガントリー 2 6 の回転中心であり、取り合い部 3 5 においてビーム経路 2 1 の入口の中心を通る。

【 0 0 5 7 】

治療台 3 3 は、図 2 に示すように、ベッド 5 0、床面 4 3 よりも高くなっている治療台取付領域 4 4 に設置された三方向駆動機構 5 3、三方向駆動機構 5 3 の上に設置された回転駆動機構 5 4、及び回転駆動機構 5 4 に取り付けられたベッド 5 0 を有する。

【 0 0 5 8 】

本実施例の粒子線照射システム 1 におけるビーム軌道調整方法を、図 5 ~ 図 7 を用いて説明する。まず、粒子線照射システム 1 の据え付けが終了した後の試運転の期間におけるビーム軌道調整方法を、図 5 及び図 6 を用いて説明する。図 5 及び図 6 に示されたステッ

プ S 1 及び S 3 ~ S 2 4 の各工程を含む手順を示す第 1 ビーム軌道調整プログラムは、メモリ 6 2 に記憶されている。さらに、メモリ 6 2 には、図 7 に示されたステップ S 2 3 , S 4 , S 5 , S 2 7 , S 7 , S 8 , S 1 6 , S 1 0 , S 2 8 , S 2 9 及び S 3 0 の各工程を含む手順を示す第 2 ビーム軌道調整プログラムも記憶されている。オペレータが入力装置 1 0 0 からビーム軌道調整装置 9 4 の軌道調整制御装置 9 5 に第 1 軌道調整開始信号を入力したとき、軌道調整制御装置 9 5 は、メモリ 6 2 に格納されている、試運転の期間におけるビーム軌道の調整を実施する第 1 ビーム軌道調整プログラムを選択し、この第 1 ビーム軌道調整プログラムの手順に基づいて加速器・輸送系制御装置 6 4 及びガントリー制御装置 7 3 のそれぞれに含まれる各制御装置等に制御指令情報を出力し、試運転の期間におけるビーム軌道の調整が以下のように実施される。

10

【 0 0 5 9 】

イオン源及び直線加速器を起動する（ステップ S 1）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した加速器・輸送系制御装置 6 4 は、イオン源及び直線加速器 1 4 を起動する。イオン源で発生したイオン（例えば、陽子）が直線加速器 1 4 に入射され、加速される。直線加速器 1 4 から出射された陽子イオンビーム（以下、単に、イオンビームという）は、入射器 5 を通してシンクロトロン加速器 3 の環状のビームダクト 4 に入射される。イオンビームはビームダクト 4 内を周回する。

【 0 0 6 0 】

イオンビームのエネルギーを設定する（ステップ S 2）。オペレータが、入力装置 1 0 0 から、シンクロトロン加速器 3 から出射するイオンビームのエネルギーとして、例えば、最大の 2 5 0 M e V を入力する。このエネルギー「2 5 0 M e V」は、軌道調整制御装置 9 5 に入力され、軌道調整制御装置 9 5 においてイオンビームのエネルギーとして設定される。

20

【 0 0 6 1 】

回転ガントリーを任意の或る回転角度まで回転させる（ステップ S 3）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した回転制御装置 7 4 は、回転装置 4 2 を駆動して、取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整を実施する任意の或る回転角度（例えば、2 7 0 °）まで回転ガントリー 2 6 を回転させ、回転ガントリー 2 6 はこの角度で保持される。任意の或る回転角度は、回転ガントリー 2 6 の回転範囲 0 ° ~ 3 6 0 ° 内の一つの回転角度であり、例えば、0 ° または 1 0 ° であってもよい。回転角度判定装置 7 5 は、角度検出器 2 8 で測定された角度に基づいて回転ガントリー 2 6 が 2 7 0 ° まで回転したことを確認する。

30

【 0 0 6 2 】

イオンビームの設定エネルギーに基づいて加速器の電磁石に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 4）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した電磁石制御装置 6 5 は、電源 5 5 を制御してビームダクト 4 に沿って配置された偏向電磁石 6、四極電磁石 6 及びセプトム電磁石 1 3 のそれぞれに供給される励磁電流を、ステップ S 2 で設定したイオンビームのエネルギー（2 5 0 M e V）に対応する励磁電流に調節する。

【 0 0 6 3 】

イオンビームの設定エネルギーに基づいてビーム輸送系の電磁石に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 5）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した電磁石制御装置 6 5 は、電源 5 6 を制御して、ビーム経路 1 6 に沿って配置された偏向電磁石 1 7 及び四極電磁石 1 8 , 1 9 等のそれぞれに供給される励磁電流、及びビーム経路 2 1 に沿って配置された偏向電磁石 2 2 ~ 2 4 及び四極電磁石 2 5 等のそれぞれに供給される励磁電流を、ステップ S 2 で設定したイオンビームのエネルギー（2 5 0 M e V）に対応する励磁電流に調節する。

40

【 0 0 6 4 】

ステアリング電磁石に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 6）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力したステアリング電磁石制御装置 6 9 は電源 5 8 A ~ 5 8 D のそれぞれを制御し、励磁電流をステアリング電磁石 H H 1 , H H 2 , G H 1 及び G H

50

2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石に供給する。

【0065】

イオンビームの設定エネルギーに基づいて高周波加速空洞に供給する高周波電圧を制御する(ステップS7)。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力した高周波電圧制御装置66は、高周波電源装置57を制御して高周波加速空洞8に印加する高周波電圧を調節し、ビームダクト4内を周回するイオンビームを設定されたエネルギーである250 MeVまで加速する。

【0066】

加速器からイオンビームを出射する(ステップS8)。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力した出射制御装置67は開閉スイッチ12を閉じる。このため、高周波電源11からの高周波電圧が出射用高周波電極10からビームダクト4内を周回しているイオンビームに印加される。周回しているイオンビームは、高周波電圧の印加によって、シンクロトロン加速器3からセプタム電磁石13を通してビーム経路16に出射される。出射されたイオンビームはビーム経路15及び21を通して照射装置29に達する。

【0067】

H E B T系のビーム位置モニタでビーム位置を測定する(ステップS9)。ビーム経路16に配置されたビーム位置モニタHP1及びHP2のそれぞれが、ビーム経路16内を通過するイオンビームのX方向及びY方向のそれぞれにおけるビーム位置を測定する。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力したビーム位置入力装置68は、ビーム位置モニタHP1及びHP2のそれぞれで測定されたX方向及びY方向のそれぞれのビーム位置を入力し、これらの入力したビーム位置をメモリ72に格納する。

【0068】

加速器からのイオンビームの出射を停止する(ステップS10)。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力した出射制御装置67は、開閉スイッチ12を開く。このため、高周波電源11からの高周波電圧の出射用高周波電極10への印加が停止され、シンクロトロン加速器3からビーム経路16へのイオンビームの出射が停止される。

【0069】

H E B T系のステアリング電磁石の励磁電流を算出する(ステップS11)。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力した励磁電流演算装置63は、ビーム位置モニタHP1及びHP2のそれぞれによって測定されたX方向及びY方向のそれぞれのビーム位置(メモリ72に格納)を用い、特許第4299269号公報に記載されたステップS20～S70の各工程(段落0086～0089及び図4参照)を実施して、変位が0及び勾配が0になるステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれのキック量を求める。ステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれのキック量が得られるそれぞれの励磁電流が、ステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流となる。算出されたこれらの励磁電流は、イオンビームのエネルギー(250 MeV)及びステアリング電磁石と対応付けてメモリ72に格納される。

【0070】

H E B T系のステアリング電磁石の各励磁電流をメモリに格納する(ステップS12)。励磁電流演算装置63は、ステップS11で算出された、ステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれの250 MeVに対する励磁電流の情報を、エネルギー及びそれらのステアリング電磁石のそれぞれと対応付けてメモリ72から中央制御装置60のメモリ62に格納する。

【0071】

以上に述べたステップS2～S12の各工程を実施することによって、ステップS2で設定されたエネルギーに関して、取り合い部35に対するビーム軌道の調整が終了する。

【0072】

試運転の期間におけるビーム軌道調整方法での、G A B T系におけるビーム軌道の調整

10

20

30

40

50

を、以下に説明する。G A B T系におけるビーム軌道の調整では、回転ガントリー 2 6 が $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ の範囲で所定の角度（例えば、 1° ）ごとに回転される。

【0073】

回転ガントリーを新たな設定回転角度まで回転する（ステップ S 1 3）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した回転制御装置 7 4 は、回転装置 4 2 を駆動して回転ガントリー 2 6 を新たな設定回転角度、例えば、 0° まで回転させる。回転ガントリー 2 6 が 0° まで回転したことは、角度検出器 2 8 で測定された角度を入力する回転角度判定装置 7 5 によって確認される。

【0074】

ステアリング電磁石に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 1 4）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力したステアリング電磁石制御装置 6 9 は、ステップ S 1 0 で算出されてメモリ 7 2 に格納された、ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの 250 MeV に対する励磁電流がこれらのステアリング電磁石に供給されるように、電源 5 8 A 及び 5 8 B のそれぞれを制御する。この結果、ステップ S 1 0 で算出された電流値の各励磁電流が、ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれに供給される。なお、ステアリング電磁石制御装置 6 9 による電源 5 8 C 及び 5 8 D の制御によって、励磁電流がステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれに供給される。

【0075】

ステップ S 1 5 がステップ S 8 と同様に実施され、シンクロトロン加速器 3 からビーム経路 1 6 に出射されたイオンビームがビーム経路 2 1 を通って照射装置 2 9 に達する。ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石に供給される各励磁電流がステップ 1 4 のように制御されるため、ビーム経路 1 6 を通るイオンビームが、ビーム経路 2 1 の入口の設定位置である中心位置を通過する。

【0076】

照射装置のビーム位置モニタでビーム位置を測定する（ステップ S 1 6）。照射装置 2 9 に取り付けられたビーム位置モニタ P R M 及び S R M のそれぞれが、照射装置 2 9 の中心軸に沿って通過するイオンビームの X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置を測定する。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力したビーム位置入力装置 6 8 は、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれによって測定された、X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置を入力し、これらの入力したビーム位置をメモリ 7 2 に格納する。その後、ステップ S 1 7 がステップ S 1 0 と同様に実施され、シンクロトロン加速器 3 からビーム経路 1 6 へのイオンビームの出射が停止される。

【0077】

G A B T 系のステアリング電磁石の励磁電流を算出する（ステップ S 1 8）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した励磁電流演算装置 6 3 は、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれによって測定された X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置（メモリ 7 2 に格納）を用い、特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報に記載されたステップ S 1 1 0 ~ S 1 6 0 の各工程（段落 0 0 9 3 ~ 0 0 9 6 及び図 4 参照）を実施して、照射装置 2 9 の中心軸からのビーム位置の変位が 0、及び勾配が 0 になるステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれのキック量を求める。ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれのキック量が得られるそれぞれの励磁電流が、ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流 $G H 1_x$ 、 $G H 1_y$ 、 $G H 2_x$ 及び $G H 2_y$ となる。算出されたこれらの励磁電流は、イオンビームのエネルギー（例えば、 250 MeV ）、回転ガントリー 2 6 の回転角度（例えば、 0° ）及びステアリング電

磁石と対応付けてメモリ72に格納される。

【0078】

GABT系のステアリング電磁石の各励磁電流をメモリに格納する(ステップS19)。励磁電流演算装置63は、ステップS18で算出された、ステアリング電磁石GH1及びGH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれの250MeVに対する励磁電流の情報を、回転ガントリー26の回転角度及びそれらのステアリング電磁石のそれぞれと対応付けてメモリ72から中央制御装置60のメモリ62に格納する。

【0079】

GABT系におけるビーム軌道の調整が回転ガントリーの回転角度の全範囲で終了したかを判定する(ステップS20)。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力した回転角度判定装置75は、GABT系20におけるビーム軌道の調整が回転ガントリー26の回転角度の全範囲において終了したかを判定する。回転角度0°におけるそのビーム軌道の調整が終了したので、ステップS20の判定は「No」である。なお、本実施例では、回転ガントリー26の回転角度の全範囲として0°~360°が設定されており、この回転角度の全範囲はメモリ62に格納されている。また、180°の範囲で回転が可能な回転ガントリーでは、回転角度の全範囲は0°~180°となる。

【0080】

新たな回転角度を設定する(ステップS21)。回転角度設定装置52は、例えば、回転角度0.5°を新たな回転角度として設定する。ステップS13において、回転制御装置74は、ステップS3と同様に、回転装置42を駆動し、回転ガントリー26を新たな設定回転角度(例えば、0.5°)まで回転させる。その後、ステップS14~S20の各工程が実施される。しかし、ステップS20の判定が「No」になるため、ステップS21及びS13~S20の各工程が、回転ガントリー26の回転角度が360°になるまで設定回転角度を0.5°ずつ増加させながら繰り返し実施される。360°の設定回転角度でステップS13~S19の各工程が実施されたとき、ステップS20の判定が「Yes」となる。ステップS20の判定が「Yes」になったとき、一つの設定エネルギー(例えば、250MeV)における、回転ガントリー26の回転角度の全範囲(0°~360°)での設定回転角度(例えば、0.5°)ごとのGABT系20におけるビーム軌道の調整が終了する。

【0081】

回転角度テーブルを作成する(ステップS22)。ステップS20の判定が「Yes」になったとき、テーブル作成装置96は、メモリ62に格納されているステップS18で求められた、回転ガントリー26の回転角度ごとの励磁電流GH1_x、GH1_y、GH2_x及びGH2_yを用いて、250MeVに対する回転角度テーブルを作成する。なお、220MeVに対する回転角度テーブルの例を図8に示す。250MeVに対して作成された回転角度テーブルは、回転ガントリー26の回転角度0°~360°の範囲内で0.5°ごとの、ステアリング電磁石GH1のX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石の励磁電流GH1_x及びGH1_y及びステアリング電磁石GH2のX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石の励磁電流GH2_x及びGH2_yを含んでいる。

【0082】

回転ガントリーを基準回転角度まで回転させる(ステップS23)。基準回転角度は、360°の範囲で回転可能な回転ガントリーに対しては、例えば、270°であり、180°の範囲で回転可能な回転ガントリーに対しては90°である。軌道調整制御装置95から制御指令情報を入力した回転制御装置74は、回転装置42を駆動して、取り付け部35に対するビーム軌道の調整を実施する基準回転角度、例えば、270°まで回転ガントリー26を回転させ、回転ガントリー26はこの角度で保持される。

【0083】

図示されていないが、ステップS23の工程が終了した後、ステップS15が実施される。このステップS15では、ステップS8と同様に、シンクロトン加速器3からイオ

10

20

30

40

50

ンビームが出射される。このイオンビームは照射装置 29 に達する。

【0084】

照射装置のビーム位置モニタでビーム位置を測定する（ステップ S 24）。回転ガントリー 26 が 270° まで回転された状態で、ステップ S 16 と同様に、ビーム位置モニタ P R M 及び S R M のそれぞれが、照射装置 29 の中心軸に沿って通過するイオンビームの X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置を測定する。軌道調整制御装置 95 から制御指令情報を入力したビーム位置入力装置 68 は、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M のそれぞれによって測定された、X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置 P R M_x、P R M_y、S P M_x 及び S P M_y を入力し、これらのビーム位置をメモリ 72 に格納する。その後、ビーム位置 P R M_x、P R M_y、S P M_x 及び S P M_y がメモリ 72 からメモリ 62 に格納される。ステップ S 24 で測定されたビーム位置 P R M_x、P R M_y、S P M_x 及び S P M_y は、ビーム軌道調整用の目標ビーム位置として、250 MeV の回転角度テーブルに含まれる、回転角度 270°（基準回転角度）に対応してメモリ 62 に格納される（図 8 参照）。さらに、ステップ S 11 で求められた、250 MeV でのステアリング電磁石 H H 1 の X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の励磁電流 H H 1_x、H H 1_y、H H 2_x 及び H H 2_y も、250 MeV の回転角度テーブルと共にメモリ 62 に格納される（図 8 参照）。

10

【0085】

ステップ S 24 の工程が終了した後、ステップ S 17 が実施される。このステップ S 17 では、ステップ S 10 と同様に、シンクロトロン加速器 3 からビーム経路 16 へのイオンビームの出射が停止される。

20

【0086】

以上により、粒子線照射システム 1 の試運転の期間における、250 MeV でのビーム軌道の調整が終了する。

【0087】

次に、ステップ S 2 で、オペレータが、入力装置 100 から、シンクロトロン加速器 3 から出射するイオンビームのエネルギーとして、250 MeV よりも 1 MeV 小さい、例えば、最大の 249 MeV を入力する。このステップ S 2 では、入力装置 100 から入力された 249 MeV が軌道調整制御装置 95 においてイオンビームの新たなエネルギーとして設定される。

30

【0088】

この新たな設定エネルギー（249 MeV）に対しても、ステップ S 3 ~ S 12 の各工程（H E B T 系 15 と G A B T 系 20 の取り合い部 35 に対するビーム軌道の調整）が前述したように実施され、そして、ステップ S 13 ~ S 21 の各工程（G A B T 系 20 におけるビーム軌道の調整）が、ステップ S 20 の判定が「Y e s」になるまで前述したように実施される。ステップ S 20 の判定が「Y e s」になるまでステップ S 13 ~ S 21 の各工程が繰り返されることにより、249 MeV を対象にして、回転ガントリー 26 の回転角度 0° ~ 360° の範囲内で 0.5° ごとに、ステアリング電磁石 G H 1 の X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の励磁電流 G H 1_x 及び G H 1_y 及びステアリング電磁石 G H 2 の X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の励磁電流 G H 2_x 及び G H 2_y が算出される。

40

【0089】

さらに、ステップ S 20 の判定が「Y e s」になった後に、前述したステップ S 22（回転角度テーブルの作成）、ステップ S 23（回転ガントリーの基準回転角度への回転）、ステップ S 15（イオンビームの出射）、ステップ S 24（照射装置内でのビーム位置の測定）及びステップ S 17（イオンビームの出射停止）が順次実施される。ステップ S 22 では、249 MeV に対する回転角度テーブルが作成される。ステップ S 24 で測定された、照射装置 29 内でのビーム位置 P R M_x、P R M_y、S P M_x 及び S P M_y は、ビーム軌道調整用の目標ビーム位置として、249 MeV の回転角度テーブルに含まれる、回転角度 270°（基準回転角度）に対応してメモリ 62 に格納される。ステップ S 11 で

50

求められた、249 MeVでの励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ も、249 MeVの回転角度テーブルと共にメモリ62に格納される。

【0090】

以上により、粒子線照射システム1の試運転の期間における、249 MeVでのビーム軌道の調整が終了する。

【0091】

その後、ステップS2において、248 MeVから150 MeVまで1 MeVごとに低下させた各イオンビームのエネルギーを入力装置100から入力して各イオンビームのエネルギーを設定しながら、248 MeV～150 MeVの範囲で1 MeVずつ減少させながら、ステップS3～S12の各工程、ステップS13～S21の各工程、ステップS22、ステップS23、ステップS15、ステップS24及びステップS17の各工程が繰り返して実施される。

【0092】

この結果、150 MeV～250 MeVの範囲内で1 MeVごとに作成された各回転角度テーブルの情報は、メモリ62に格納される。このようなエネルギーごとに作成された回転テーブル情報は、該当するエネルギーでの励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ 、及びビーム軌道調整用の目標ビーム位置である PRM_x 、 PRM_y 、 SPM_x 及び SPM_y と対応付けてメモリ62に格納されている。図8に示された、回転ガントリー26の回転角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲内で 0.5° ごとの、ステアリング電磁石GH1のX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石の励磁電流 $GH1_x$ 及び $GH1_y$ 及びステアリング電磁石GH2のX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石の励磁電流 $GH2_x$ 及び $GH2_y$ をそれぞれ含む回転角度テーブルは、エネルギーが220 MeVのときの回転角度テーブルである。図8には、エネルギーが220 MeVのときの励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ 、及びビーム軌道調整用の目標ビーム位置である PRM_x 、 PRM_y 、 SPM_x 及び SPM_y も併せて示されている。図9は、回転ガントリー26の回転角度が 270° のときの、ステップ16で測定された、設定エネルギーごとのビーム位置 PRM_x 、 PRM_y 、 SPM_x 及び SPM_y を示している。

【0093】

以上で、粒子線照射システム1の試運転の期間におけるビーム軌道の調整が終了する。

【0094】

ビーム軌道の調節が全て終了した後、ビーム軌道が調整された粒子線照射システム1を用いて治療台33のベッド50上に横たわっている患者34の患部にイオンビームを照射し、患部の治療が行われる。この治療の詳細については後述する。

【0095】

次に、粒子線照射システム1によるがんの治療が開始されてから或る期間が経過したとき、建屋のゆがみ等によりHEBT系15のビーム経路16に変形により、粒子線照射システム1のビーム軌道が変化し、イオンビームの患部への照射が精度良く実施できない恐れがある。このため、粒子線照射システム1を停止した状態で定期的に粒子線照射システム1のビーム軌道の調整が実施される。このビーム軌道の調整を、図7を用いて説明する。オペレータが入力装置100からビーム軌道調整装置97の軌道調整制御装置98に第2軌道調整開始信号を入力したとき、軌道調整制御装置98は、メモリ62に格納されている、治療開始後におけるビーム軌道の調整を実施する第2ビーム軌道調整プログラムを選択し、この第2ビーム軌道調整プログラム（図7参照）の手順に基づいて制御指令情報を加速器・輸送系制御装置64及びガントリー制御装置73のそれぞれに含まれる各制御装置等へ出力する。このため、治療開始後におけるビーム軌道の調整が以下のように実施される。

【0096】

図7に図示されていないが、取り合い部35に対するビーム軌道の調整と同様に、ステップS1（イオン源及び直線加速器14の起動）が実施される。図7に示されたステップS23、S2、S4及びS5の各工程が実施される。ステップS23では、回転ガントリー

10

20

30

40

50

ー 26 が、図 6 に示されたステップ 23 と同様に、制御指令情報を入力した回転制御装置 74 により基準回転角度である 270° まで回転される。以後、回転ガントリー 26 は基準回転角度 270° に保持される。ステップ S2 では、前述の試運転の期間におけるビーム軌道の調整と同様に、オペレータが入力装置 100 から入力されたイオンビームのエネルギー (250 MeV) が設定される。ステップ S4 及び S5 の各工程は、軌道調整制御装置 98 から制御指令情報を入力した電磁石制御装置 65 のそれぞれの制御によって、取り合い部 35 に対するビーム軌道の調整におけるステップ S4 及び S5 の各工程 (図 5 参照) と同様に実施される。

【0097】

ステアリング電磁石に供給する励磁電流を制御する (ステップ S27)。軌道調整制御装置 98 から制御指令情報を入力したステアリング電磁石制御装置 69 は、ステアリング電磁石 HH1 及び HH2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の各励磁電流を、メモリ 62 に格納された 250 MeV に対する励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ に調節する。さらに、ステアリング電磁石制御装置 69 は、ステアリング電磁石 GH1 及び GH2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の各励磁電流を、メモリ 62 に格納された 250 MeV の回転角度テーブルの、回転角度 270° における励磁電流 $GH1_x$ 、 $GH1_y$ 、 $GH2_x$ 及び $GH2_y$ に調節する。

【0098】

その後、ステップ S7 及び S8 の各工程が、軌道調整制御装置 98 から制御指令情報を入力した高周波電圧制御装置 66 及び出射制御装置 67 のそれぞれの制御によって、順次実施される。250 MeV のイオンビームがシンクロトロン加速器 3 からビーム経路 16 に出射され、このイオンビームがビーム経路 21 を通って照射装置 29 に到達する。

【0099】

照射装置のビーム位置モニタでビーム位置を測定する (ステップ S16)。試運転の期間におけるビーム軌道の調整で実施されるステップ S16 と同様に、ビーム位置入力装置 68 が、ビーム位置モニタ PRM 及び SPM のそれぞれによって測定された、X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置 PRM_x 、 PRM_y 、 SPM_x 及び SPM_y を入力し、これらの入力したビーム位置をメモリ 72 に格納する。その後、ステップ S10 が実施され、シンクロトロン加速器 3 からビーム経路 16 へのイオンビームの出射が停止される。

【0100】

HBT 系のステアリング電磁石の励磁電流を算出する (ステップ S28)。軌道調整制御装置 98 から制御指令情報を入力した励磁電流演算装置 70 は、ビーム位置モニタ PRM 及び SPM のそれぞれによって測定された X 方向及び Y 方向のそれぞれのビーム位置がメモリ 62 に格納された 250 MeV に対するビーム軌道調整用の目標ビーム位置になるように、ステアリング電磁石 HH1 及び HH2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれのキック量を求める。ステアリング電磁石 HH1 及び HH2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれのキック量が得られるそれぞれの励磁電流が、ステアリング電磁石 HH1 及び HH2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流となる。求められた励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ は、エネルギー及びステアリング電磁石と対応付けてメモリ 62 に格納される。なお、ステップ S28 における HBT 系の各ステアリング電磁石の励磁電流の算出は、ビーム位置モニタ PRM 及び SPM で測定された各ビーム位置を用いてステップ S18 と同様に行われる。

【0101】

ステアリング電磁石 HH1 及び HH2 のそれぞれの励磁電流を更新する (ステップ S29)。励磁電流更新装置 99 が、ステップ S28 で算出された、ステアリング電磁石 HH1 及び HH2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石の 250 MeV に対する励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ の各情報を用いて、メモリ 62 に格納されている 250 MeV に対するステアリング電磁石 HH1 及び HH2

10

20

30

40

50

のそれぞれの各励磁電流を更新する。このとき、メモリ 62 に格納されている、エネルギーごとの回転角度テーブル情報及びビーム軌道調整用の目標ビーム位置は、更新されない。すなわち、メモリ 62 に格納されている、各エネルギーに対する励磁電流 $HH1_x$, $HH1_y$, $HH2_x$ 及び $HH2_y$ 、回転ガントリー 26 の回転角度ごとの励磁電流 $GH1_x$, $GH1_y$, $GH2_x$ 及び $GH2_y$ 、及び目標ビーム位置 PRM_x 、 PRM_y 、 SPM_x 及び SPM_y のうち励磁電流 $HH1_x$, $HH1_y$, $HH2_x$ 及び $HH2_y$ のみが更新される。

【0102】

以上で一つのエネルギー (250 MeV) に対する、粒子線照射システム 1 によるがん治療の開始後におけるビーム軌道の調整が終了する。その後、ステップ S2 において、249 MeV から 150 MeV まで 1 MeV ごとに低下させた各イオンビームのエネルギーを入力装置 100 から入力して各イオンビームのエネルギーを設定しながら、249 MeV ~ 150 MeV の範囲で 1 MeV ずつ減少させながら、ステップ S4、S5、S27、S7、S8、S16、S10、S28 及び S29 の各工程が繰り返し実施される。150 MeV に対するステップ S29 の工程が終了したとき、がんの治療が開始された後で実施される粒子線照射システム 1 のビーム軌道の調整が終了する。なお、以上に述べたがんの治療が開始された後で実施される粒子線照射システム 1 のビーム軌道の調整は、前述したように定期的に実施され、ステップ S16 でビーム位置モニタ PRM 及び SRM により測定されたそれぞれのビーム位置が、ビーム軌道調整用の目標ビーム位置からずれていない場合でも実施される。

【0103】

がん治療の開始後における粒子線照射システム 1 のビーム軌道の調整が終了した後における、粒子線治療システム 1 を用いた患部へのイオンビームの照射方法を、図 10 を用いて以下に説明する。このイオンビームの照射方法に関する図 10 に示されたステップ S1、S31 ~ S38、S7、S39、S9、S40 及び S41 の各工程を含む手順を示すプログラムは、メモリ 62 に記憶されている。オペレータが入力装置 100 から照射制御装置 93 に治療開始信号を入力したとき、照射制御装置 93 はこの手順に基づいて制御指令情報を加速器・輸送系制御装置 64 及びガントリー制御装置 73 のそれぞれに含まれる各制御装置等に出力する。このため、イオンビームを用いた患部の治療が以下のように実施される。

【0104】

イオンビームを照射してがんの患部を治療する患者 34 ごとくの治療計画データが、治療前に治療計画装置 82 を用いて作成される。この治療計画データは、患者の識別番号、患者の体表面から深さ方向に分割された、患部の層の数、層ごとに照射されるイオンビームのエネルギー、イオンビームの照射方向、各層におけるイオンビームの照射位置及び各層内の各照射位置に対するイオンビームの照射量等のデータを含んでおり、データベース 81 に記憶される。照射制御装置 93 は、入力された患者識別情報を用いて、これから治療を行う患者 34 に関する治療計画データをデータベース 81 から読み込み、メモリ 62 に格納する。

【0105】

まず、患者 34 が横たわっている治療台 33 のベッド 50 を移動させ、患者 34 の、ビーム照射対象である患部を照射装置 29 の中心軸の延長線上に位置決めする。

【0106】

イオン源及び直線加速器が起動され (ステップ S1)、イオン源で発生したイオン (例えば、陽子 (または炭素イオン)) が直線加速器 14 に入射され、加速されて直線加速器 14 から出射されたイオンビームはシンクロトロン加速器 3 の環状のビームダクト 4 に入射される。

【0107】

照射装置の中心軸をイオンビームの照射方向に設定する (ステップ S31)。照射制御装置 93 から制御指令情報を入力した回転制御装置 71 は、回転装置 42 を駆動して回転ガントリー 26 を回転させ、照射装置 29 の中心軸をメモリ 62 から読み込んだ、患者 3

10

20

30

40

50

4 に対する治療計画データであるイオンビームの照射方向に一致させる。

【0108】

イオンビームを照射する一つの層を設定する（ステップ S 3 2）。照射制御装置 9 3 から制御指令情報を入力した照射位置制御装置 7 7 は、患部内のイオンビームを照射する一つの層を設定する。照射位置制御装置 7 7 によるこの層の設定では、メモリ 6 2 に格納された、患部を分割した複数の層の情報に基づいて、最も深い位置に存在する層が設定される。さらに、照射位置制御装置 7 7 は、設定された層に照射されるイオンビームのエネルギー情報（例えば、220 MeV）をメモリ 6 2 に格納された治療計画データから検索し、このエネルギー情報を電磁石制御装置 6 5、ステアリング電磁石制御装置 6 9 及び高周波電圧制御装置 6 6 に出力する。

10

【0109】

加速器の電磁石に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 3 3）。照射制御装置 9 3 から制御指令情報を入力した電磁石制御装置 6 5 は、電源 5 5 を制御して偏向電磁石 6、四極電磁石 6 及びセプトラム電磁石 1 3 のそれぞれに供給される励磁電流を、220 MeV に対応する励磁電流に調節する。

【0110】

ビーム輸送系の電磁石に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 3 4）。照射制御装置 9 3 から制御指令情報を入力した電磁石制御装置 6 5 は、電源 5 6 を制御して、H E B T 系 1 5 及び G A B T 系 2 0 のそれぞれの偏向電磁石及び四極電磁石に供給される励磁電流を、220 MeV に対応する励磁電流に調節する。

20

【0111】

ステアリング電磁石 H H 1, H H 2 に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 3 5）。照射制御装置 9 3 から制御指令情報を入力したステアリング電磁石制御装置 6 9 は、電源 5 8 A 及び 5 8 B のそれぞれを制御し、ステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石に供給される各励磁電流を、メモリ 6 2 に格納された、220 MeV に対応する更新された励磁電流 $H H 1_x$, $H H 1_y$, $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ に調節する。

【0112】

ステアリング電磁石 G H 1, G H 2 に供給する励磁電流を制御する（ステップ S 3 6）。ステアリング電磁石制御装置 6 9 は、さらに、電源 5 8 C 及び 5 8 D のそれぞれを制御し、ステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石に供給される各励磁電流を、220 MeV の回転角度テーブルに含まれる励磁電流 $G H 1_x$, $G H 1_y$, $G H 2_x$ 及び $G H 2_y$ に調節する。

30

【0113】

高周波加速空洞に供給する高周波電圧を制御する（ステップ S 3 7）。照射制御装置 9 3 から制御指令情報を入力した高周波電圧制御装置 6 6 は、220 MeV に基づいて高周波電源装置 5 7 を制御して高周波加速空洞 8 に印加する高周波電圧を調節し、ビームダクト 4 内を周回するイオンビームを 220 MeV まで加速する。

【0114】

走査電磁石を制御し、設定された層内でイオンビームの照射位置を設定する（ステップ S 3 8）。照射制御装置 9 3 から制御指令情報を入力した照射位置制御装置 7 7 は、設定された層内での照射位置の情報に基づいて走査電磁石 3 0 及び 3 1 のそれぞれに供給される励磁電流を制御し、イオンビームを目標であるその照射位置に照射するように、走査電磁石 3 0 及び 3 1 のそれぞれに偏向磁場を発生させる。走査電磁石 3 0 で発生した偏向磁場が、X 方向において、イオンビームの照射位置を目標照射位置に合わせ、走査電磁石 3 1 で発生した偏向磁場が、Y 方向において、イオンビームの照射位置を目標照射位置に合わせる。

40

【0115】

ステップ S 7 において、照射位置制御装置 7 7 は、イオンビームの照射位置を設定した後、イオンビーム照射開始信号を出射制御装置 6 7 に出力する。このとき、出射制御装置

50

67は開閉スイッチ12を閉じるため、シンクロトロン加速器3からビーム経路16にイオンビームが出射される。

【0116】

照射位置での照射線量が目標線量に一致したかを判定する(ステップS39)。目標の照射位置への照射線量が線量モニタ32で測定される。測定された照射線量を線量モニタ32から入力した線量判定装置78は、測定された照射線量が目標の照射線量に達したかを判定する。測定された照射線量が目標の照射線量に一致していないとき、ステップS37の判定は「No」となり、測定された照射線量が目標の照射線量に一致してステップS37の判定が「Yes」になるまでステップS7及びステップS37の各工程が繰り返して実施される。ステップS37の判定が「Yes」になったとき、線量判定装置78は、

10

【0117】

ステップS9において、ビーム出射停止信号を入力した出射制御装置67が開閉スイッチ12を開くため、シンクロトロン加速器3からのイオンビームの出射が停止される。

【0118】

設定された層内へのイオンビームの照射が終了かを判定する(ステップS40)。或る照射位置へのイオンビームの照射が終了したとき、照射制御装置93から制御指令情報を入力した層判定装置79は、設定された層内へのイオンビームの照射が終了かを判定する。設定された層内に未照射の照射位置が存在してステップS38の判定が「No」になったとき、ステップS38、S7、S39、S9及びS40の各工程が、ステップS40の判定が「Yes」になるまで、その層内の未照射の照射位置ごとに繰り返し実施される。

20

【0119】

ステップS40の判定が「Yes」になったとき、全ての層へのイオンビームの照射が終了したかを判定する(ステップS41)。層判定装置79が、全ての層へのイオンビームの照射が終了したかを判定する。イオンビームの照射が行われていない層が残っているため、ステップS41の判定は、「No」になり、ステップS32～S38、S7、S39、S9、S40及びS41の各工程が、再度順次実行される。このとき、ステップS32では、2番目に深い位置にある層が設定される。この層に照射されるイオンビームに必要なエネルギーは、219MeVである。さらに、ステップS35では、ステアリング電磁石制御装置69による制御により、ステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれに供給される励磁電流が、219MeVに対する、ステップS29で更新された励磁電流HH1_x、HH1_y、HH2_x及びHH2_yに調節される。ステップS36では、ステアリング電磁石GH1及びGH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石のそれぞれに供給される各励磁電流が、219MeVの回転角度テーブルに含まれる励磁電流GH1_x、GH1_y、GH2_x及びGH2_yに調節される。

30

【0120】

再度実施されたステップS41の判定は「No」であるため、患部の最も浅い層に対するステップS41の判定が「Yes」になるまで、その最も浅い層に向かって層ごとに、イオンビームのエネルギーを1MeVずつ減少させながらステップS32～S38、S7、S39、S9、S40及びS41の各工程が繰り返し実施される。ステップS40の判定が「Yes」になったとき、イオンビームを用いた患部の治療が終了する。

40

【0121】

本実施例では、経年変化による建屋のゆがみ等の影響を受けない照射装置29内に配置されたビーム位置モニタPRM及びSPMによって、照射装置29内における各ビーム位置を測定し、測定されたこれらのビーム位置を用いて、HEBT系15とGABT系20の取り付け部35よりも上流に位置するステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれのX方向ステアリング電磁石及びY方向ステアリング電磁石の励磁電流HH1_x、HH1_y、HH2_x及びHH2_yをそれぞれ算出する。このため、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間を短縮することができる。特に、本実施例では、治療開始後におけるビ

50

ーム軌道の調整において、回転ガントリー 26 の回転角度を一つの回転角度である基準回転角度に保持した状態で、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M により照射装置 29 内における各ビーム位置を測定し、励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ を算出するため、ビーム軌道の調整に要する時間をさらに短縮することができる。

【 0 1 2 2 】

特に、走査電磁石 30 及び 31 を有して患部の形状に合わせてイオンビームを走査することができる粒子線治療システム 1 では、イオンビームの照射方向において複数に分割された患部の各層に対してイオンビームを照射するため、イオンビームのエネルギーを変える必要がある。この結果、治療後におけるビーム軌道の調整もエネルギーごとに行わなければならない。しかしながら、本実施例では、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M によって測定された各ビーム位置を用いて励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ を算出するため、回転ガントリー 26 の回転角度を変えずに、イオンビームのエネルギーごとに励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ を算出すればよいので、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間を著しく短縮することができる。

【 0 1 2 3 】

もし、治療開始後におけるビーム軌道の調整において、前述したように、特許第 4 2 9 9 2 6 9 号公報の段落 0 0 9 3 ~ 0 0 9 6 に記載された手法で、回転ガントリー 26 に取り付けられたステアリング電磁石 G H 1 及び G H 2 のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流を算出する場合には、回転ガントリー 26 を所定角度で回転させ、その所定角度ごとにビーム位置モニタ P R M 及び S P M によって測定された各ビーム位置を用いてそれらの励磁電流を算出しなければならない。しかし、本実施例は、ビーム位置モニタ P R M 及び S P M によって測定された各ビーム位置を用いて、取り付け部 35 よりも上流に位置するステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれの励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ を算出するので、回転ガントリー 26 を所定角度で回転させ、その所定角度ごとにこれらの励磁電流を算出する必要がない。

【 0 1 2 4 】

本実施例の治療開始後におけるビーム軌道の調整を行った後に、イオンビームの照射による患部の治療を行う場合には、治療開始後におけるビーム軌道の調整において算出された励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ になるように、加速器・輸送系制御装置 64 のステアリング電磁石制御装置 69 により、ステアリング電磁石 H H 1 の X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石、及びステアリング電磁石 H H 2 の X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれに供給される励磁電流が制御される。この結果、建屋のゆがみ等により H E B T 系 15 のビーム経路 16 に変形が生じ、取り付け部 35 において H E B T 系 15 の出口の中心の位置と G A B T 系 20 の入口の中心（ビーム経路 21 の入口の中心）の位置のずれたとしても、シンクロトロン加速器 3 からビーム経路 16 に出射されたイオンビームは、ビーム経路 21 の入口の中心を通過し、照射装置 29 内においてその出射されたイオンビームのエネルギーに対応する目標ビーム位置 $P R M_x$ 、 $P R M_y$ 、 $S P M_x$ 及び $S P M_y$ を通過する。このように、本実施例の治療開始後におけるビーム軌道の調整を実施することにより、建屋にゆがみ等が生じて H E B T 系 15 のビーム経路 16 に変形が生じた場合においても、患部へのイオンビームの照射を精度良く行うことができる。

【 0 1 2 5 】

治療開始後におけるビーム軌道の調整時に、ステップ S 28 において算出された励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ は、イオンビームのエネルギーに対応させて更新され、メモリ 62 に格納される。このため、治療開始後におけるビーム軌道の調整を行った後の或る期間における、イオンビームの照射による患部の治療に際して、その算出された励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ を用いてステアリング電磁石 H H 1 及び H H 2 のそれぞれに供給される励磁電流を制御することができる。

【 0 1 2 6 】

10

20

30

40

50

粒子線照射システム 1 による治療開始後において、経年変化により建屋等のゆがみが生じた場合には、H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 と G A B T 系 2 0 のビーム経路 2 1 の取り合い部 3 5 においてビーム経路 1 6 の出口の中心とビーム経路 2 1 の入口の中心の間に若干のずれが生じるが、回転ガントリー 2 6 自体は剛性が高くしかもその支持構造が強固であるため、建屋等のゆがみにより、回転ガントリー 2 6 に変形が生じない。このため、G A B T 系 2 0 のビーム経路 2 1 及び照射装置 2 9 にも変形が生じない。

【 0 1 2 7 】

それ故に、粒子線照射システム 1 の試運転の期間において実施されたビーム軌道の調整時に作成してメモリ 6 2 に格納されている、エネルギーごとの回転角度テーブル情報に含まれる励磁電流 $G H 1_x$ 、 $G H 1_y$ 、 $G H 2_x$ 及び $G H 2_y$ を用いて、治療開始後におけるビーム軌道の調整時において回転ガントリー 2 6 に取り付けられたステアリング電磁石 $G H 1$ 及び $G H 2$ のそれぞれの X 方向ステアリング電磁石及び Y 方向ステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流を調節することができる。このため、治療開始後におけるビーム軌道の調整時において、回転ガントリー 2 6 の設定角度ごとにステアリング電磁石 $G H 1$ 及び $G H 2$ のそれぞれの励磁電流を算出すること、及びこれらを算出するために、回転ガントリー 2 6 の設定角度ごとに照射装置 2 9 内の各ビーム位置をビーム位置モニター P R M 及び S P M により測定することが不要になり、治療開始後におけるビーム軌道の調整が非常に簡略化され、このビーム軌道の調整に要する時間を著しく短縮することができる。

【 0 1 2 8 】

メモリ 6 2 に格納されている、エネルギーごとの回転角度テーブル情報に含まれる励磁電流 $G H 1_x$ 、 $G H 1_y$ 、 $G H 2_x$ 及び $G H 2_y$ は、粒子線照射システム 1 を用いて患部の治療を行うときの、ステアリング電磁石 $G H 1$ 及び $G H 2$ のそれぞれの励磁電流の調節にも用いることができる。

【 0 1 2 9 】

本実施例によれば、治療開始後におけるビーム軌道の調整において、メモリ 6 2 に格納されている、エネルギーごとの回転角度テーブル情報に含まれる前述の励磁電流 $G H 1_x$ 、 $G H 1_y$ 、 $G H 2_x$ 及び $G H 2_y$ 、及び各エネルギーの回転角度テーブル情報に対応付けられてメモリ 6 2 に格納されている目標ビーム位置 $P R M_x$ 、 $P R M_y$ 、 $S P M_x$ 及び $S P M_y$ を用いて、各エネルギーに対応する、ステアリング電磁石 $H H 1$ 及び $H H 2$ のそれぞれの励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ を算出するので、治療開始後におけるビーム軌道の調整を精度良く行うことができる。

【 実施例 2 】

【 0 1 3 0 】

本発明の他の好適な実施例である実施例 2 の粒子線照射システムを、図 1 4、図 1 5 及び図 1 6 を用いて以下に説明する。本実施例の粒子線照射システム 1 A は、実施例 1 の粒子線照射システム 1 の制御システム 5 9 を制御システム 5 9 A に替えた構成を有する。粒子線照射システム 1 A の他の構成は実施例 1 の粒子線照射システム 1 と同じである。制御システム 5 9 A は C P U 6 1 A 及びメモリ 6 2 を有する中央制御装置 6 0 A 及び加速器・輸送系制御装置 6 4 A を有しており、中央制御装置 6 0 A 及び加速器・輸送系制御装置 6 4 A 以外の構成は制御システム 5 9 と同じである。

【 0 1 3 1 】

さらに、C P U 6 1 A は、C P U 6 1 において、ビーム軌道調整装置 9 4 をビーム軌道調整装置 9 4 A に及びビーム軌道調整装置 9 7 をビーム軌道調整装置 9 7 A にそれぞれ替えた構成を有する。ビーム軌道調整装置 9 4 A はビーム軌道調整装置 9 4 において軌道調整制御装置 9 5 を軌道調整制御装置 9 5 A に替えた構成を有し、ビーム軌道調整装置 9 7 A はビーム軌道調整装置 9 7 において軌道調整制御装置 9 8 を軌道調整制御装置 9 8 A に替えた構成を有する（図 1 6 参照）。C P U 6 1 A の他の構成は C P U 6 1 と同じであり、ビーム軌道調整装置 9 4 A の他の構成はビーム軌道調整装置 9 4 と同じであり、ビーム軌道調整装置 9 7 A の他の構成はビーム軌道調整装置 9 7 と同じである。

【 0 1 3 2 】

加速器・輸送系制御装置 64A は、実施例 1 で用いられる加速器・輸送系制御装置 64 にエネルギー設定装置 51 を追加した構成を有する。加速器・輸送系制御装置 64A の他の構成は加速器・輸送系制御装置 64 と同じである。エネルギー設定装置 51 は、軌道調整制御装置 95A 及び 97A にそれぞれ接続される。

【0133】

本実施例の粒子線照射システム 1A におけるビーム軌道調整方法を、図 5、図 17 及び図 18 を用いて説明する。まず、粒子線照射システム 1A の据え付けが終了した後の試運転の期間におけるビーム軌道調整方法を、図 5 及び図 17 を用いて説明する。図 5 及び図 17 に示されたステップ S1 ~ S26 の各工程を含む手順を示す第 3 ビーム軌道調整プログラムは、メモリ 62 に記憶されている。軌道調整制御装置 95A で実施されるその手順は、実施例 1 において軌道調整制御装置 95 で実施される図 5 及び図 6 に示されたステップ S1 ~ S24 にステップ S25 及び S26 を追加した手順になっている。さらに、メモリ 62 には、図 18 に示されたステップ S23, S2, S4, S5, S27, S7, S8, S16, S25, S26, S10, S28 及び S29 の各工程を含む手順を示す第 4 ビーム軌道調整プログラムも記憶されている。

【0134】

オペレータが入力装置 100 からビーム軌道調整装置 94A の軌道調整制御装置 95A に第 1 軌道調整開始信号を入力したとき、軌道調整制御装置 95A は、メモリ 62 に格納されている、試運転の期間におけるビーム軌道の調整を実施する第 3 ビーム軌道調整プログラムを選択し、この第 3 ビーム軌道調整プログラムの手順に基づいて制御指令情報を加速器・輸送系制御装置 64A 及びガントリー制御装置 73 のそれぞれに含まれる各制御装置等に出力する。このため、試運転の期間におけるビーム軌道の調整が以下のように実施される。

【0135】

取り合い部 35 に対するビーム軌道の調整を行うステップ S1, S3 ~ S12 の各工程（図 5 参照）は、軌道調整制御装置 95A からの制御指令情報を入力した、実施例 1 と同様な各制御装置によって実施される。なお、ステップ S1 とステップ S3 の間で実施されるステップ S2（イオンビームのエネルギー設定）では、実施例 1 とは異なり、軌道調整制御装置 95 から制御指令情報を入力したエネルギー設定装置 51 によりシンクロトロン加速器 3 から出射するイオンビームのエネルギーが、例えば、最大の 250 MeV に自動的に設定される。ステップ S3 では、回転ガントリー 26 が任意の或る回転角度（例えば、270°）まで回転される。

【0136】

ステップ S12 が終了した後、試運転の期間における GABT 系におけるビーム軌道の調整が実施される。このビーム軌道の調整は、ステップ S13 ~ S17、S20、S21、S18、S19 及び S22 ~ S25 の各工程（図 17 参照）によって実施される。

【0137】

すなわち、ステップ S13（回転ガントリー 26 の回転）、ステップ S14（ステアリング電磁石の励磁）、ステップ S15（イオンビームの出射）、ステップ S16（ビーム位置モニタ PRM, SPM で測定されたビーム位置の入力）及びステップ S17（イオンビームの出射停止）が、この順番に、実施例 1 と同様に実施される。上記のステップ S13 では、回転角度が、例えば、0° になるように、回転ガントリー 26 が回転される。そして、ステップ S18 及び S19 の各工程が実施例 1 と同様に実施され、次に、ステップ S20（回転角度の判定）の工程が実施される。ステップ S18 では、エネルギーが 250 MeV で回転角度が 0° における励磁電流 $GH1_x$ 、 $GH1_y$ 、 $GH2_x$ 及び $GH2_y$ が求められる。

【0138】

ステップ S19 の次に実施されるステップ S20 の判定が「No」であるとき、回転角度設定装置 52 によるステップ S21（新たな回転角度の設定）が実施され、この新たな回転角度が 0.5° に設定される。この設定された新たな回転角度においてステップ S1

3 ~ S 2 0 の各工程が実施される。このとき、ステップ S 2 0 の判定が「N o」になるため、ステップ S 2 1、S 1 3 ~ S 2 0 の各工程を、ステップ S 2 1 で新たな回転角度を 0 . 5 ° ずつ増加させながら新たな回転角度 3 6 0 ° におけるステップ S 2 0 の判定が「Y e s」になるまで繰り返し実施する。

【 0 1 3 9 】

ステップ S 2 0 の判定が「Y e s」になったとき、テーブル作成装置 9 6 によるステップ S 2 2 (回転角度テーブルの作成) が実施例 1 と同様に実施され、作成された 2 5 0 M e V に対する回転角度テーブルの情報がメモリ 6 2 に格納される。

【 0 1 4 0 】

ステップ S 2 2 が終了した後、実施例 1 と同様に、ステップ S 2 3 , S 1 5 , S 2 4 及び S 1 7 の各工程がこの順番に実施される。ステップ S 1 7 が終了した後、ビーム軌道の調整がイオンビームのエネルギーの全範囲で終了したかが判定される (ステップ S 2 5) 。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力したエネルギー判定装置 7 1 は、ビーム軌道の調整がイオンビームのエネルギーの全範囲において終了したかを判定する。2 5 0 M e V に対してステップ S 3 ~ S 2 4 の各工程が終了したので、ステップ S 2 5 の判定は「N o」になる。なお、本実施例では、イオンビームのエネルギー全範囲として 1 5 0 M e V ~ 2 5 0 M e V が設定されており、このエネルギーの範囲はメモリ 6 2 に格納されている。

【 0 1 4 1 】

新たなエネルギーを設定する (ステップ S 2 6) 。エネルギー設定装置 5 1 は、例えば、2 4 9 M e V を新たなエネルギーとして設定する。ステップ S 2 5 の判定が「Y e s」になるまで、2 4 9 M e V ~ 1 5 0 M e V の範囲内で 1 M e V ずつ減少させながら、ステップ S 3 ~ S 1 2 の各工程、ステップ S 2 0 の判定が「Y e s」になるまで繰り返されるステップ S 1 3 ~ S 2 1 の各工程、及びステップ S 2 0 の判定が「Y e s」になった後におけるステップ S 2 2 , S 2 3 , S 1 5 , S 2 4 , S 1 7 , S 2 5 及び S 2 6 の各工程が繰り返し実施される。

【 0 1 4 2 】

1 5 0 M e V に対するステップ S 2 5 の判定が「Y e s」になったとき、本実施例の粒子線照射システム 1 A における据え付けの期間内のビーム軌道の調整が終了する。このとき、メモリ 6 2 には、1 5 0 M e V ~ 2 5 0 M e V の範囲内で 1 M e V ごとに作成された各回転角度テーブルの情報が、該当するエネルギーでの励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ 、及びビーム軌道調整用の目標ビーム位置である $P R M_x$ 、 $P R M_y$ 、 $S P M_x$ 及び $S P M_y$ と対応付けて格納されている。

【 0 1 4 3 】

試運転の期間でのビーム軌道調整が終了した後、粒子線照射システム 1 A によるがんの治療が開始される。このがんの治療が開始されてから或る期間が経過したときに実施されるビーム軌道の調整を、図 1 8 を用いて説明する。

【 0 1 4 4 】

このビーム軌道の調整は、実施例 1 と同様に、定期的に実施される。軌道調整制御装置 9 8 A で実施される、図 1 8 に示された第 4 ビーム軌道調整プログラムの手順は、実施例 1 において軌道調整制御装置 9 8 で実施される図 7 に示された手順にステップ S 2 5 及び S 2 6 を追加し、ステップ S 1 0 , S 2 8 及び S 2 9 の各工程をステップ S 2 5 の判定が「Y e s」になったときに実施する。

【 0 1 4 5 】

オペレータが入力装置 1 0 0 からビーム軌道調整装置 9 7 A の軌道調整制御装置 9 8 A に第 2 軌道調整開始信号を入力したとき、軌道調整制御装置 9 8 A は、メモリ 6 2 に格納されている、治療開始後におけるビーム軌道の調整を実施する第 4 ビーム軌道調整プログラムを選択し、この第 4 ビーム軌道調整プログラム (図 1 8 参照) の手順に基づいて制御指令情報を加速器・輸送系制御装置 6 4 A 及びガントリー制御装置 7 3 のそれぞれに含まれる各制御装置等へ出力する。このため、治療開始後におけるビーム軌道の調整が、ステ

10

20

30

40

50

ステップS25の判定が「Yes」になるまでステップS4, S5, S27, S7, S8, S16, S25及びS26が繰り返され、ステップS25の判定が「Yes」になった後のステップS10, S28及びS29の各工程の実施により行われる。

【0146】

図18に図示されていないが、取り合い部35に対するビーム軌道の調整(図5参照)と同様に、ステップS1, S23及びS2の各工程が順次実施される。ステップS23では、回転ガントリ-26が、前述したように、制御指令情報を入力した回転制御装置74により基準回転角度である270°まで回転される。ステップS2ではエネルギー設定装置51によりイオンビームのエネルギーが250MeVに自動的に設定される。回転ガントリ-26が270°に回転された状態を保持して、前述のステップS4, S5, S27, S7, S8, S16, S25及びS26の各工程がステップS25の判定が「Yes」になるまで繰り返され、さらに、ステップS25の判定が「Yes」になった後のステップS10, S28及びS29の各工程が実施される。

10

【0147】

すなわち、ステップS4, S5, S27, S7, S8, S16の各工程が、この順番に実施され、そして、次に、ステップ25(エネルギーの判定)が実施される。ステップ25の判定が「No」であるとき、ステップ26(新たなエネルギーの設定)がエネルギー設定装置51により実施され、新たなエネルギーとして249MeVが設定される。このエネルギー249MeVから150MeVの範囲内で1MeVずつ減少させながら、ステップS4, S5, S27, S7, S8, S16, S25及びS26の各工程が、ステップS25の判定が「Yes」になるまで繰り返えされる。

20

【0148】

ステップS25の判定が「Yes」になったとき、イオンビームの出射が停止され(ステップS10)、ステップS28において、励磁電流演算装置70によってステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれに供給される励磁電流HH1_x, HH1_y, HH2_x及びHH2_yが、実施例1と同様に、150MeV~250MeVの範囲内で1MeVごとに算出される。ステップS29(励磁電流の更新)では、励磁電流更新装置99によって、ステップS28で1MeVごとに算出された、ステアリング電磁石HH1及びHH2のそれぞれに供給される励磁電流を用いて、実施例1と同様に、メモリ62に格納されている、エネルギーごとの励磁電流HH1_x, HH1_y, HH2_x及びHH2_yを更新する。

30

【0149】

以上により、本実施例の粒子線照射システム1Bにおける治療開始後のビーム軌道の調整が終了する。

【0150】

本実施例は、実施例1で生じる各効果を得ることができる。本実施例では、エネルギーの全範囲で新たに設定されたエネルギーごとにビーム位置モニタPRM, SPMによるビーム位置を測定した後に、エネルギーごとに、ステアリング電磁石GH1及びGH2のそれぞれに供給される各励磁電流が算出されるため、本実施例の、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間が、実施例1の、治療開始後におけるビーム軌道の調整に要する時間よりもさらに短縮される。

40

【実施例3】

【0151】

本発明の他の好適な実施例である実施例3の粒子線照射システムを、図19及び図20を用いて以下に説明する。

【0152】

実施例1及び2の各粒子線照射システム1及び1Aはイオンビーム発生装置としてシンクロトロン加速器3を含むイオンビーム発生装置2を用いているが、本実施例の粒子線照射システム1Bはイオンビーム発生装置としてサイクロトロン加速器84を含むイオンビーム発生装置2Aを用いている。

【0153】

50

粒子線照射システム 1 B は、図 1 9 に示すように、イオンビーム発生装置 2 A、H E B T 系 1 5、G A B T 系 2 0、回転ガントリー 2 6、照射装置 2 9 及び制御システム 5 9 B を備えている。H E B T 系 1 5、G A B T 系 2 0、回転ガントリー 2 6 及び照射装置 2 9 のそれぞれの構成は、実施例 1 の粒子線照射システム 1 におけるそれらの構成と同じである。

【 0 1 5 4 】

ここでは、粒子線照射システム 1 と異なっているイオンビーム発生装置 2 A 及び制御システム 5 9 B について主に説明する。

【 0 1 5 5 】

イオンビーム発生装置 2 A は、イオン源 8 3 及びサイクロトロン加速器 8 4 を含む。サイクロトロン加速器 8 4 は、円形の真空容器 9 2、偏向電磁石 8 5 A 及び 8 5 B、高周波加速装置 8 6 及び出射用のセプタム電磁石 8 7 を有する。イオン源 8 3 に接続された真空ダクト 4 6 が、真空容器 9 2 の中心位置まで伸びてこの真空容器 9 2 に接続される。水平面において湾曲している入射用電極 9 1 が、真空ダクト 4 6 の開放端付近で真空容器 9 2 内に配置される。偏向電磁石 8 5 A 及び 8 5 B は、それぞれ、半円形状をしており、直線部を互いに対向させるように配置され、真空容器 9 2 の上面及び下面を覆っている。

【 0 1 5 6 】

真空容器 9 2 のイオンビーム出射口に設けられるセプタム電磁石 8 7 は、H E B T 系 1 5 のビーム経路 1 6 に接続される。金属製の複数の板を有するデグレーダ 8 8 が、セプタム電磁石 8 7 と四極電磁石 1 8 の間で、ビーム経路 1 6 に取り付けられている。デグレーダ 8 8 は、サイクロトロン加速器 8 4 から出射されたイオンビームのエネルギーを調節する機能を有し、厚みの異なる複数の金属製の板（図示せず）を有している。これらの金属製の板は、ビーム経路 1 6 に垂直な方向に移動可能である。厚みの異なるこれらの金属製の板を、1 枚または複数枚、ビーム経路 1 6 を横切るようにビーム経路 1 6 内に挿入することによって、ビーム経路 1 6 を通るイオンビームのエネルギーの減衰量が制御される。この結果、患者 3 4 の患部に照射されるイオンビームのエネルギーを変えることができ、患部の深さ方向に存在する各層にイオンビームを照射することができる。

【 0 1 5 7 】

制御システム 5 9 B は、中央制御装置 6 0、加速器・輸送系制御装置 6 4 B、ガントリー制御装置 7 3、走査制御装置 7 6 及びデータベース 8 1 を有する（図 1 9 参照）。中央制御装置 6 0 は、照射制御装置 9 3、ビーム軌道調整装置 9 4 及びビーム軌道調整装置 9 8 を含む C P U 6 1、及び C P U 6 1 に接続されたメモリ 6 2 を有する。この C P U 6 1 は、ここでは詳細に説明しないが、具体的には、実施例 1 で述べた、図 4 B に示された構成を有する。

【 0 1 5 8 】

粒子線照射システム 1 B に用いられる制御システム 5 9 B に含まれるガントリー制御装置 7 3 及び走査制御装置 7 6 は、実施例 1 の粒子線照射システム 1 に用いられる制御システム 5 9 に含まれるガントリー制御装置 7 3 及び走査制御装置 7 6 と同じ構成を有する。制御システム 5 9 B に含まれる加速器・輸送系制御装置 6 4 B は、実施例 1 に用いられる制御システム 5 9 に含まれる加速器・輸送系制御装置 6 4 において高周波電圧制御装置 6 6 をデグレーダ制御装置 8 9 に替えた構成を有する。加速器・輸送系制御装置 6 4 B の他の構成は加速器・輸送系制御装置 6 4 と同じである。

【 0 1 5 9 】

照射制御装置 9 3 は、電磁石制御装置 6 5、出射制御装置 6 7、ステアリング電磁石制御装置 6 9、メモリ 7 2、デグレーダ制御装置 8 9、回転制御装置 7 4、照射位置制御装置 7 7、線量判定装置 7 8、層判定装置 7 9 及びメモリ 8 0 に、それぞれ、接続される。軌道調整制御装置 9 5 は、電磁石制御装置 6 5、出射制御装置 6 7、ビーム位置入力装置 6 8、ステアリング電磁石制御装置 6 9、エネルギー判定装置 7 1、メモリ 7 2、デグレーダ制御装置 8 9、回転制御装置 7 4、回転角度判定装置 7 5 及び回転角度設定装置 5 2 に、それぞれ、接続される。軌道調整制御装置 9 8 は、電磁石制御装置 6 5、出射制御装

置 6 7、ビーム位置入力装置 6 8、ステアリング電磁石制御装置 6 9、エネルギー判定装置 7 1、メモリ 7 2、デグレダ制御装置 8 9 及び回転制御装置 7 4 に、それぞれ、接続される。照射位置制御装置 7 7 が、電磁石制御装置 6 5、出射制御装置 6 7、ステアリング電磁石制御装置 6 9 及びデグレダ制御装置 8 9 に接続される。入力装置 1 0 0 は、実施例 1 と同様に、照射制御装置 9 3、軌道調整制御装置 9 5 及び軌道調整制御装置 9 8 に接続される。

【 0 1 6 0 】

本実施例の粒子線照射システム 1 B におけるビーム軌道調整方法を、図 2 1、図 6 及び図 2 2 を用いて説明する。まず、粒子線照射システム 1 B の据え付けが終了した後の試運転の期間におけるビーム軌道調整方法を、図 2 1 及び図 6 を用いて説明する。図 2 1 及び図 6 に示されたステップ S 1、S 3、S 4 A、S 5、S 6、S 4 3 及び S 8 ~ S 2 4 の各工程を含む手順を示す第 5 ビーム軌道調整プログラムは、メモリ 6 2 に記憶されている。さらに、メモリ 6 2 には、図 2 2 に示されたステップ S 2 3、S 4 A、S 5、S 2 7、S 4 3、S 8、S 1 6、S 1 0、S 2 8 及び S 2 9 の各工程を含む手順を示す第 6 ビーム軌道調整プログラムも記憶されている。

【 0 1 6 1 】

オペレータが入力装置 1 0 0 から軌道調整制御装置 9 5 に第 1 軌道調整開始信号を入力したとき、軌道調整制御装置 9 5 は、メモリ 6 2 に格納されている、試運転の期間におけるビーム軌道の調整を実施する第 5 ビーム軌道調整プログラムを選択し、この第 5 ビーム軌道調整プログラムの手順に基づいて制御指令情報を加速器・輸送系制御装置 6 4 A 及びガントリー制御装置 7 3 のそれぞれに含まれる各制御装置等へ出力する。このため、試運転の期間におけるビーム軌道の調整が以下のように実施される。

【 0 1 6 2 】

ステップ S 1 において、加速器・輸送系制御装置 6 4 B によりイオン源及び直線加速器が起動される。ステップ S 2 では、オペレータにより入力装置 1 0 0 から入力されたイオンビームのエネルギー（例えば、最大の 2 5 0 M e V）が設定される。ステップ S 3 で、回転ガントリー 2 6 を任意の或る回転角度（例えば、2 7 0 °）まで回転させる。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力した電磁石制御装置 6 5 は、電源 5 5 A（図 2 0 参照）を制御し、サイクロトロン加速器 8 4 の偏向電磁石 8 5 A 及び 8 5 B 及びセプタム電磁石 8 7 に供給される励磁電流を調節する（ステップ S 4 A）。さらに、ステップ S 5（H E B T 系 1 5 及び G A B T 系 2 0 の偏向電磁石及び四極電磁石の励磁）及びステップ S 6（ステアリング電磁石 H H 1、H H 2、G H 1 及び G H 2 の励磁）が実施される。

【 0 1 6 3 】

設定されたエネルギーに基づいてデグレダを制御する（ステップ S 4 3）。軌道調整制御装置 9 5 から制御指令情報を入力したデグレダ制御装置 8 9 は、駆動装置 9 0 を制御し、イオンビームのエネルギーを設定されたエネルギー（例えば、2 5 0 M e V）まで減衰させるために、デグレダ 8 8 の金属製の板を、ビーム経路 1 6 を横切るように移動させる。

【 0 1 6 4 】

その後、実施例 1 と同様に、ステップ S 8 ~ S 1 2 がそれぞれ実施される。なお、ステップ S 8 の出射制御装置 6 7 によるイオンビームの出射は、出射制御装置 6 7 による制御によって、入射用電極 9 1 に電圧を印加することによって行われる。入射用電極 9 1 に電圧を印加すると、イオン源 8 3 からビームダクト 4 6 を通して真空容器 9 2 内に入射されたイオンは、電圧を印加された入射用電極 9 1 によって真空容器 9 2 内の水平面内に曲げられ、高周波加速装置 8 6 によって加速される。また、ステップ S 1 0 の出射制御装置 6 7 によるイオンビームの出射停止は、出射制御装置 6 7 による制御によって、入射用電極 9 1 への電圧の印加を停止することによって行われる。以上により、粒子線照射システム 1 B における試運転の期間内での、2 5 0 M e V に対する取り合い部 3 5 に対するビーム軌道の調整が終了する。

【 0 1 6 5 】

粒子線照射システム 1 B における試運転の期間内での、G A B T 系 2 0 におけるビーム軌道の調整が、実施例 1 と同様に、ステップ S 1 3 ~ S 2 1 の各工程をステップ S 2 0 の判定が「Y e s」になるまで繰り返し、さらに、ステップ S 2 0 の判定が「Y e s」になったとき、ステップ S 2 2 , S 2 3 , S 1 5 , S 2 4 及び S 1 7 のそれぞれをこの順番で実施することによって行われる。この結果、2 5 0 M e V に対する G A B T 系 2 0 におけるビーム軌道の調整が終了し、2 5 0 M e V における回転角度テーブル情報が作成される。そして、2 5 0 M e V の回転角度テーブル情報、2 5 0 M e V における、励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ 及びビーム軌道調整用の目標ビーム位置 $P R M_x$ 、 $P R M_y$ 、 $S P M_x$ 及び $S P M_y$ が、対応付けられてメモリ 6 2 に格納される。

【 0 1 6 6 】

10

その後、2 4 9 M e V ~ 1 5 0 M e V の範囲内で 1 M e V ずつ減少させながらイオンビームのエネルギーをステップ S 2 で入力装置 1 0 0 から入力し、1 M e V ごとのエネルギーに対してステップ S 3、S 4 A、S 5、S 6、S 4 3 及び S 8 ~ S 2 4 の各工程、ステップ S 2 0 が「Y e s」になるまで繰り返されるステップ S 1 3 ~ S 2 1 の各工程、及びステップ S 2 0 が「Y e s」になった後のステップ S 2 2 , S 2 3 , S 1 5 , S 2 4 及び S 1 7 の各工程が繰り返し実施される。そして、エネルギーごとに回転角度テーブル情報が作成され、エネルギーごとに、回転角度テーブル情報、励磁電流 $H H 1_x$ 、 $H H 1_y$ 、 $H H 2_x$ 及び $H H 2_y$ 及びビーム軌道調整用の目標ビーム位置 $P R M_x$ 、 $P R M_y$ 、 $S P M_x$ 及び $S P M_y$ が対応付けられてメモリ 6 2 に格納される。

【 0 1 6 7 】

20

以上により、粒子線照射システム 1 B における試運転の期間内でのビーム軌道の調整が終了する。

【 0 1 6 8 】

粒子線照射システム 1 B を用いた患部へのイオンビームの照射による患部の治療が開始された後に実施されるビーム軌道の調整を、図 2 2 を用いて説明する。オペレータが入力装置 1 0 0 から軌道調整制御装置 9 7 に第 2 軌道調整開始信号を入力したとき、軌道調整制御装置 9 7 は、メモリ 6 2 に格納されている、治療開始後におけるビーム軌道の調整を実施する第 6 ビーム軌道調整プログラムを選択し、この第 6 ビーム軌道調整プログラム（図 2 2 参照）の手順に基づいて制御指令情報を加速器・輸送系制御装置 6 4 B 及びガントリ制御装置 7 3 のそれぞれに含まれる各制御装置等へ出力する。このため、粒子線照射システム 1 B による、治療が開始された後に実施されるビーム軌道の調整が以下のように実施される。

30

【 0 1 6 9 】

図 2 2 に示された手順は、実施例 1 の粒子線照射システム 1 によって治療開始後に実施されるビーム軌道の調整を実施する、図 7 に示された手順において、ステップ S 4 及び S 7 の各工程をステップ S 4 A 及び S 4 3 の各工程に替えた手順である。

【 0 1 7 0 】

図 2 2 に図示されていないが、ステップ S 1（イオン源及び直線加速器 1 4 の起動）が実施される。その後、図 2 2 に示された手順においても、実施例 1 で治療が開始された後に実施されるビーム軌道の調整で実施されたステップ S 2 3 及び S 2 が順次実施される。その後、回転ガントリー 2 6 の回転角度が基準回転角度（例えば、2 7 0 °）に維持され、イオンビームのエネルギーを 2 5 0 M e V に保った状態で、前述のステップ 4 A が実施され、ステップ S 5 及び S 2 7 が実施例 1 と同様に実施される。前述のステップ S 4 3（デグレダの制御）が実施され、さらに、ステップ S 8、S 1 6、S 1 0、S 2 8 及び S 2 9 の各工程が実施される。ステップ S 8（イオンビームの出射）は入射用電極 9 1 への電圧の印加によって行われ、ステップ S 1 0（イオンビームの出射停止）は入射用電極 9 1 への電圧の印加停止によって行われる。ステップ S 1 6、S 2 8 及び S 2 9 の各工程は、実施例 1 と同様に行われる。

40

【 0 1 7 1 】

2 5 0 M e V に対する S 4 A、S 5、S 2 7、S 4 3、S 8、S 1 6、S 1 0、S 2 8

50

及び S 2 9 の各工程が終了したとき、249 MeV ~ 150 MeV の範囲内で 1 MeV ずつ減少させながらイオンビームのエネルギーをステップ S 2 で入力装置 100 から入力し、1 MeV ごとのエネルギーに対してステップ S 4 A, S 5, S 2 7, S 4 3, S 8, S 1 6, S 1 0, S 2 8 及び S 2 9 の各工程が繰り返し実施される。このため、250 MeV ~ 150 MeV の範囲内で 1 MeV ごとのエネルギーに対して、励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ が算出され、算出されたこれらの励磁電流を用いてメモリ 62 に格納されている励磁電流 $HH1_x$ 、 $HH1_y$ 、 $HH2_x$ 及び $HH2_y$ が更新される。

【0172】

サイクロトロン加速器 84 を含む粒子線照射システム 1 B を対象にした本実施例でも、実施例 1 で生じる各効果を得ることができる。

10

【0173】

粒子線照射システム 1 B における治療開始後に実施されるビーム軌道の調整は、図 22 に示された手順の替りに、粒子線照射システム 1 A における治療開始後のビーム軌道の調整で実施される図 18 に示された手順を用いてもよい。この場合には、図 18 に示されたステップ S 4 及び S 7 は上記したステップ S 4 A 及び S 4 3 になり、図 18 に示されたステップ 8 及び S 10 は出射制御装置 67 により入射用電極 91 への電圧の印加を ON, OFF することにより実施される。

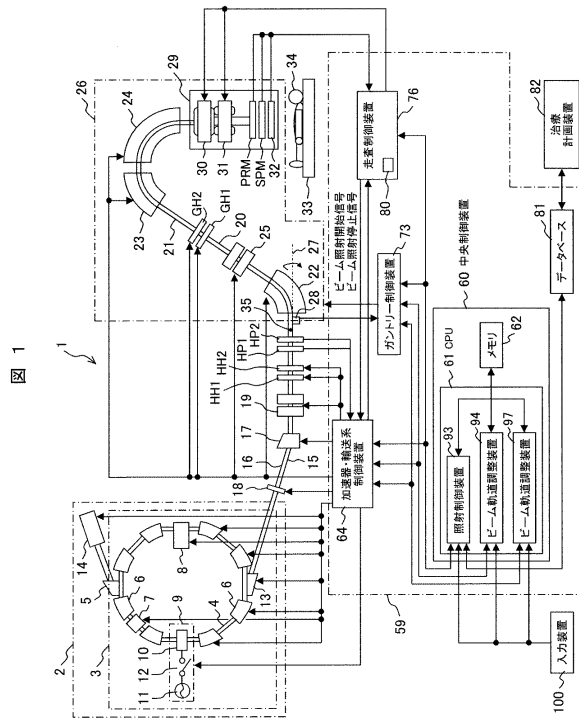
【符号の説明】

【0174】

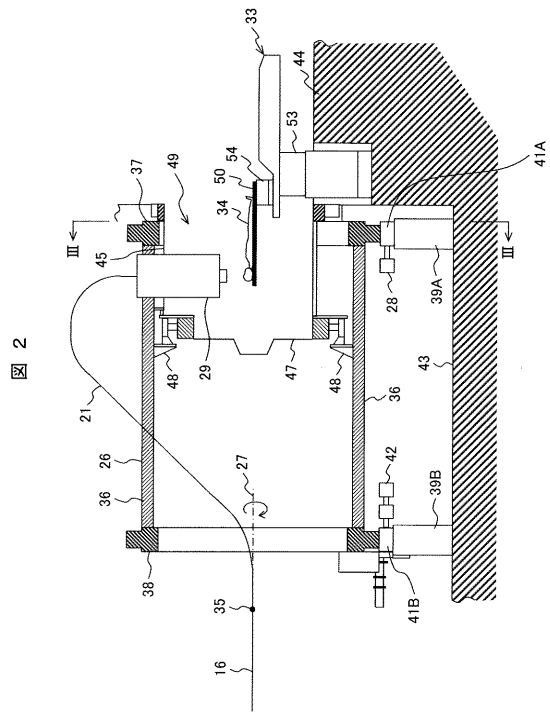
1, 1A, 1B...粒子線照射システム、2, 2A...イオンビーム発生装置、3...シンクロトロン加速器、4...ビームダクト、8...高周波加速空洞、9...高周波印加装置、15...高エネルギービーム輸送系、16, 21...ビーム経路、20...ガントリービーム輸送系、26...回転ガントリー、29...照射装置、30, 31...走査電磁石、32...線量モニタ、59, 59A, 59B...制御システム、63, 70...励磁電流演算装置、91...入射用電極、93...照射制御装置、94, 94A, 97, 97A...ビーム軌道調整装置、95, 95A, 98, 98A...軌道調整制御装置、96...テーブル作成装置、99...励磁電流更新装置、HH1, HH2, GH1, GH2...ステアリング電磁石、HP1, HP2, PRM, SPM...ビーム位置モニタ。

20

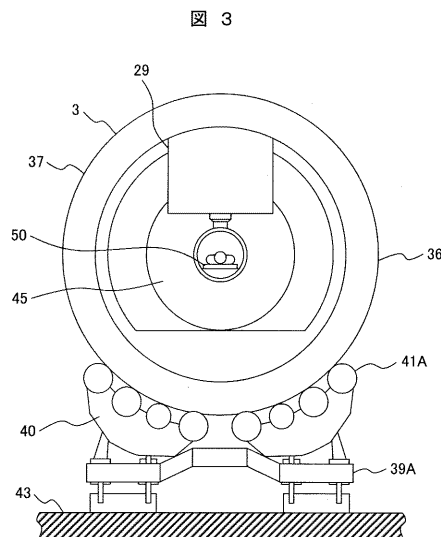
【図 1】



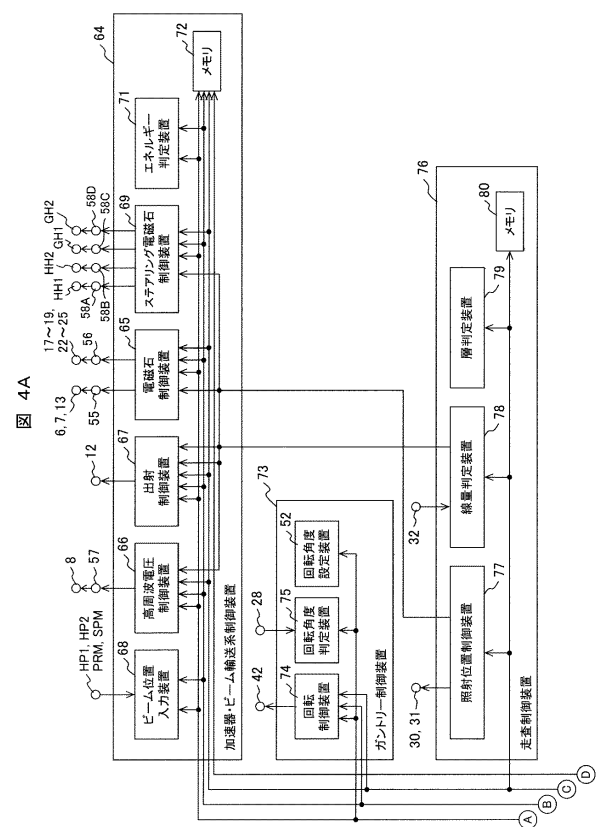
【図 2】



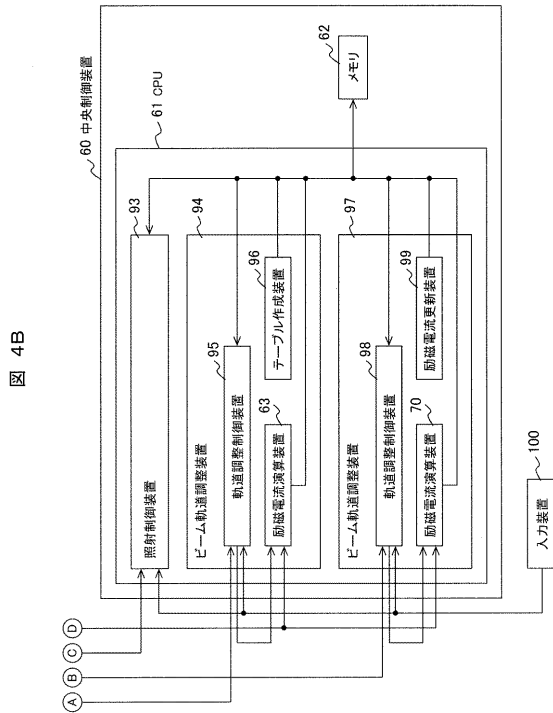
【図 3】



【図 4 A】

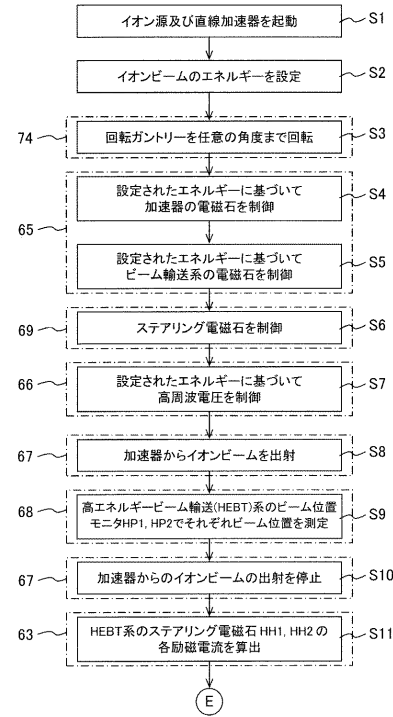


【図4B】



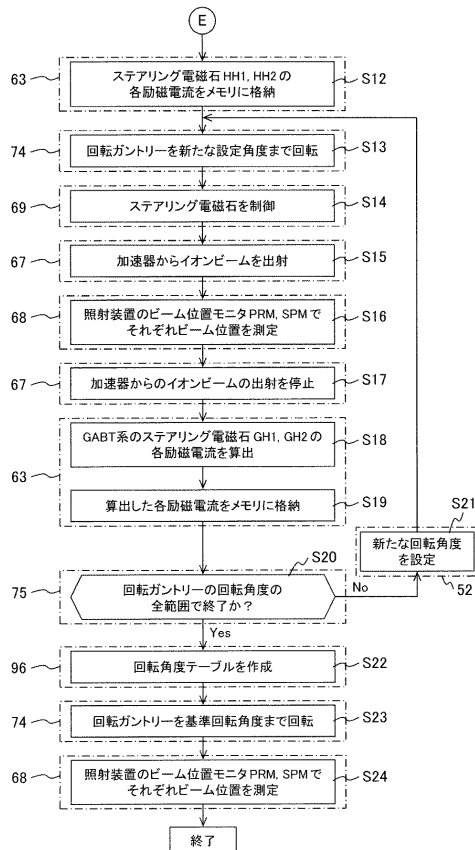
【図5】

図 5



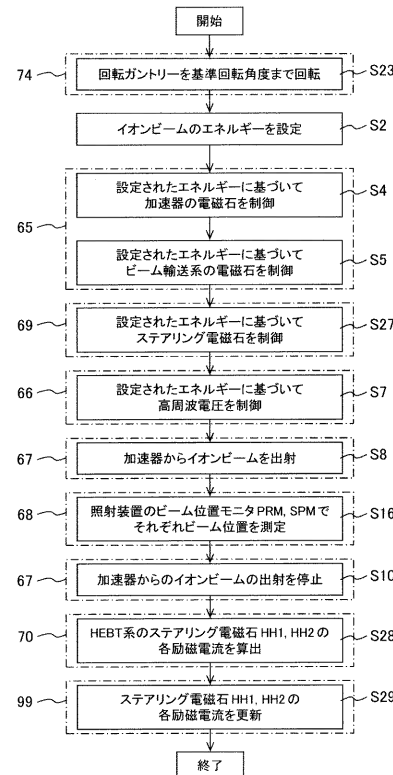
【図6】

図 6



【図7】

図 7



【 図 8 】

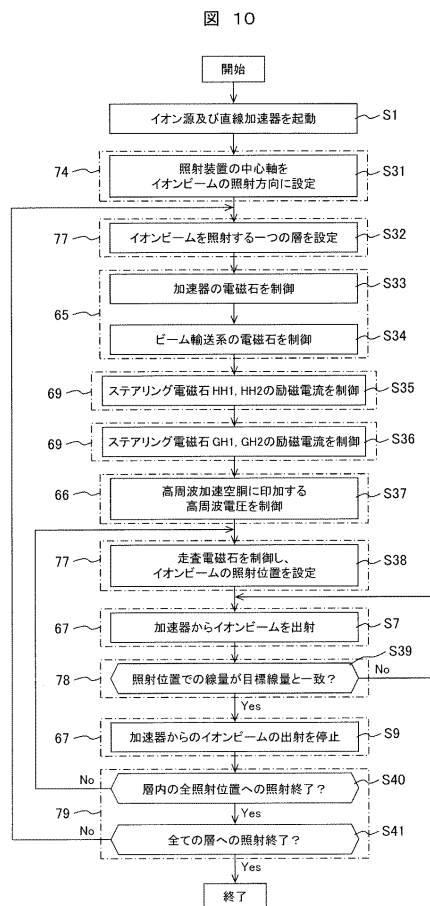
HH1 _x :0.0, HH1 _y :0.0, HH2 _x :1.05, HH2 _y :1.05									
回転ガントリの回転角度	GH1 _x	GH1 _y	GH2 _x	GH2 _y	PRM _x	PRM _y	SPM _x	SPM _y	
0.0°	1.64	-0.11	-0.60	-3.39					
0.5°	1.62	-0.11	-0.61	-3.41					
•	•	•	•	•					
•	•	•	•	•					
•	•	•	•	•					
90.0°	-3.82	-0.08	-1.12	-4.23					
90.5°	-3.85	-0.07	-1.12	-4.21					
•	•	•	•	•					
•	•	•	•	•					
•	•	•	•	•					
•	•	•	•	•					
270.0°	3.49	7.78	-0.01	1.65	0.0	0.0	0.0	0.0	
•	•	•	•	•					
•	•	•	•	•					

【 図 9 】

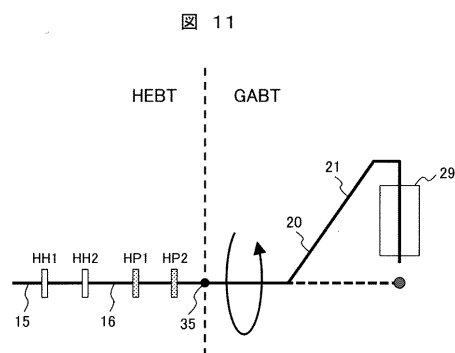
图 9

エネルギー(MeV)	PRM _x	PRM _y	SPM _x	SPM _y
250.0	0.004	-0.008	0.005	-0.008
249.0	0.019	0.005	0.015	0.017
.
.
.
.

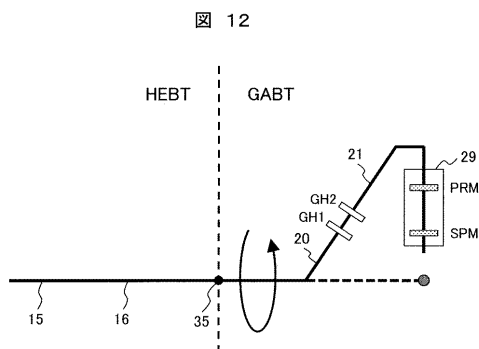
【 ㊦ 1 0 】



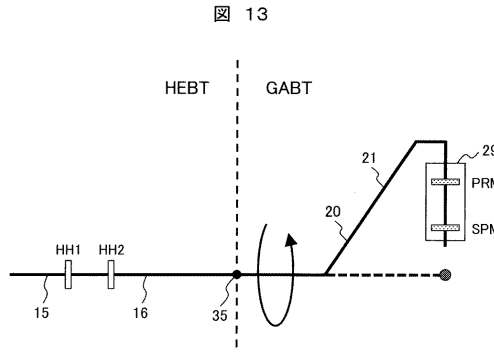
【 図 1 1 】



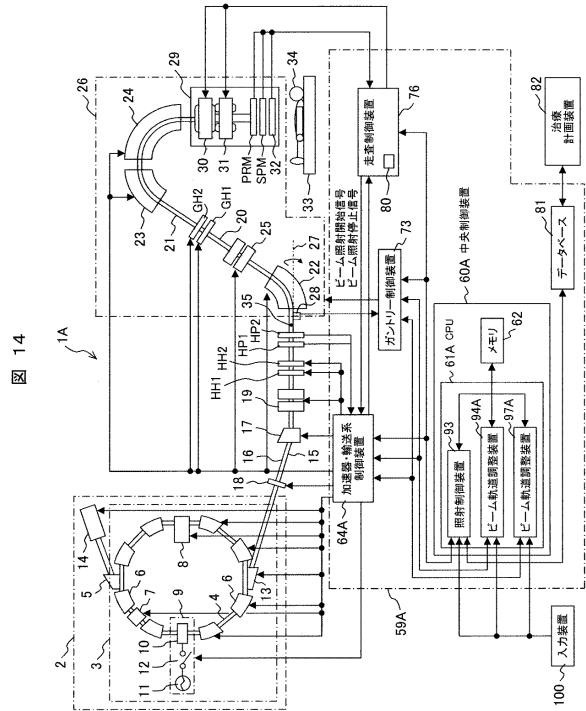
【 図 1 2 】



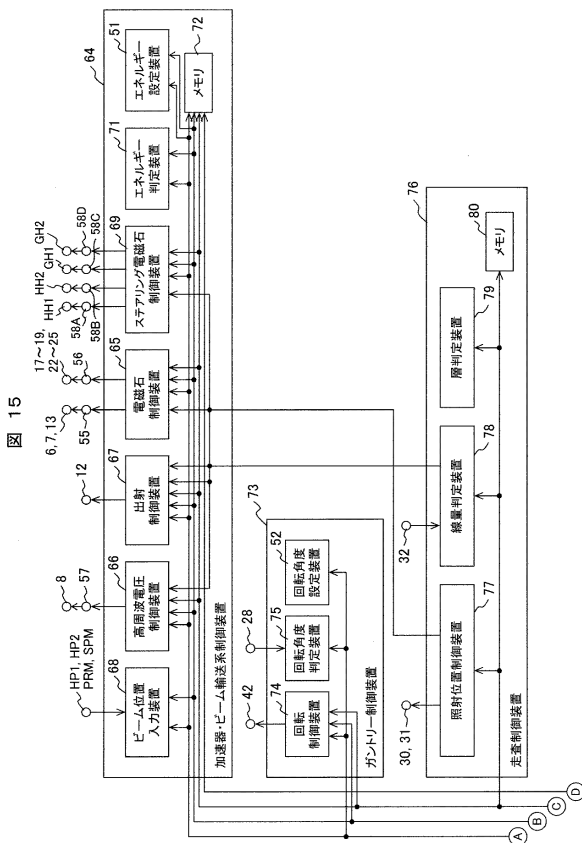
【図 13】



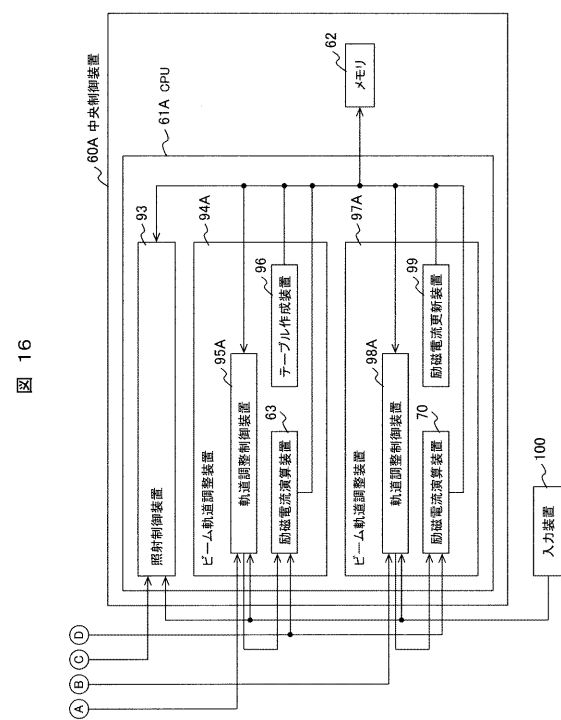
【図 14】



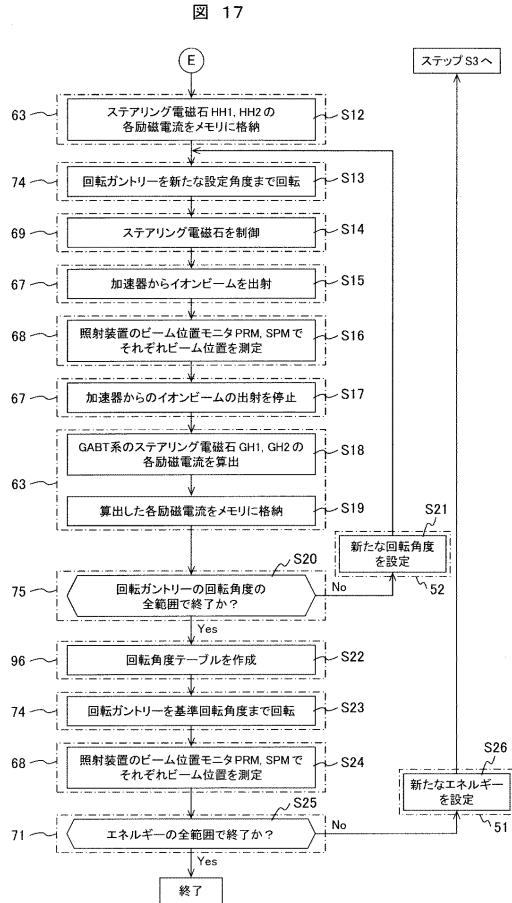
【図 15】



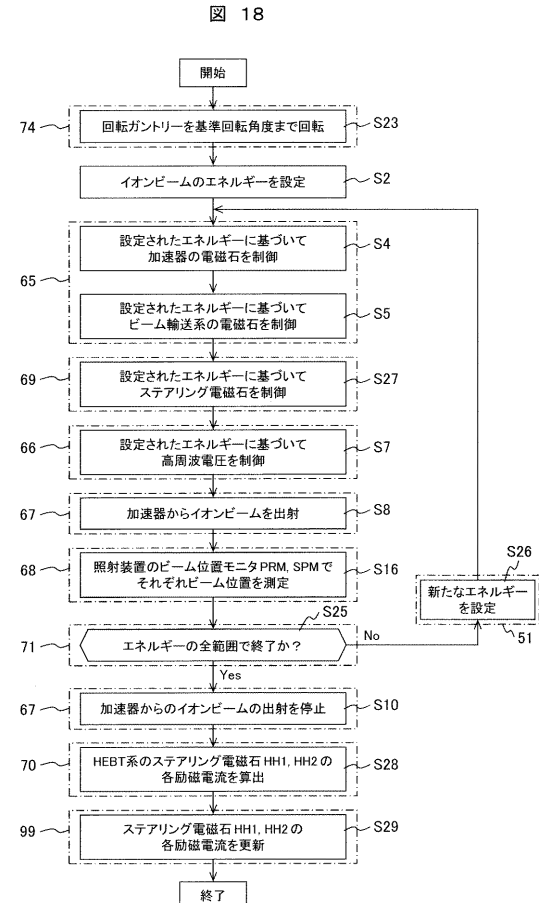
【図 16】



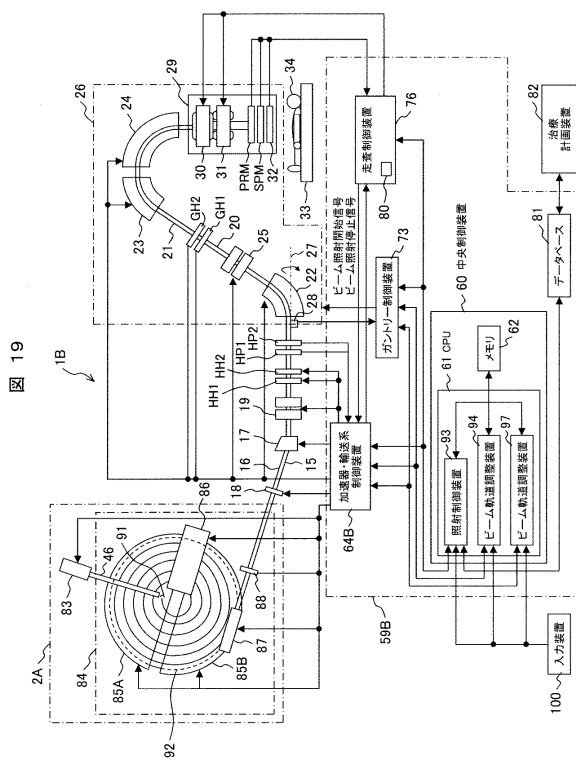
【図 17】



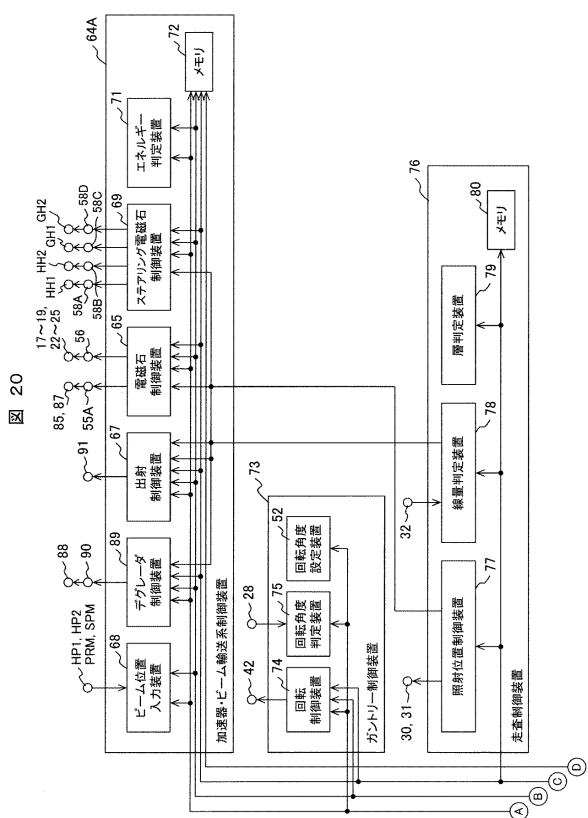
【図 18】



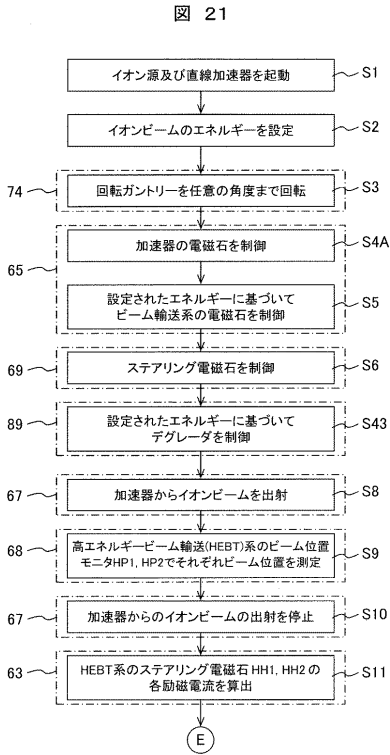
【図 19】



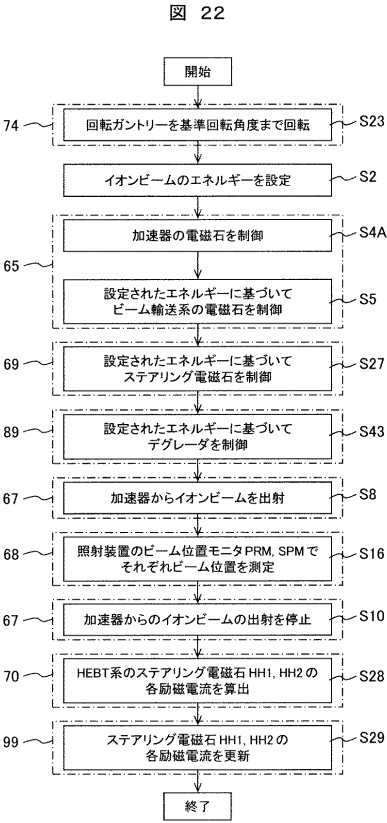
【図 20】



【図 2 1】



【図 2 2】



フロントページの続き

(72)発明者 今川 知久

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 宮崎 敏長

(56)参考文献 特開2005-329252(JP,A)

特開2011-005096(JP,A)

特開2003-282300(JP,A)

特開2011-250910(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

A61N 5/10