

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4523723号
(P4523723)

(45) 発行日 平成22年8月11日 (2010. 8. 11)

(24) 登録日 平成22年6月4日 (2010. 6. 4)

(51) Int. Cl.

F I

G 2 1 K 5/04 (2006. 01)

A 6 1 N 5/10 (2006. 01)

G 2 1 K 1/093 (2006. 01)

G 2 1 K 5/10 (2006. 01)

G 2 1 K 5/04 A

G 2 1 K 5/04 C

A 6 1 N 5/10 H

G 2 1 K 1/093 D

G 2 1 K 1/093 F

請求項の数 5 (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-610018 (P2000-610018)
 (86) (22) 出願日 平成12年4月3日 (2000. 4. 3)
 (65) 公表番号 特表2002-541464 (P2002-541464A)
 (43) 公表日 平成14年12月3日 (2002. 12. 3)
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2000/002948
 (87) 国際公開番号 W02000/060611
 (87) 国際公開日 平成12年10月12日 (2000. 10. 12)
 審査請求日 平成18年8月30日 (2006. 8. 30)
 (31) 優先権主張番号 99106657.2
 (32) 優先日 平成11年4月1日 (1999. 4. 1)
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(73) 特許権者 599138272
 ジー エス アイ ゲゼルシャフト フュ
 ア シュベールイオーネンフォルシュング
 エム ベー ハー
 ドイツ連邦共和国, D-64291 ダル
 ムスタッド, プランクストラッセ 1
 (74) 代理人 100088904
 弁理士 庄司 隆
 (72) 発明者 アレクセイ ドリンスキー
 ドイツ, D-64291 ダルムスタッド
 、プラंकストラッセ 1
 (72) 発明者 ベルンハルド フランクザク
 ドイツ, D-64291 ダルムスタッド
 、プラंकストラッセ 1

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 イオン光学システムを有するガントリ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

イオンビーム (4) をガントリの回転軸 (7) から曲げるための、回転軸 (7) に対し
 て 40 ~ 45 ° の範囲の曲げ角度を有する第 1 曲げ電磁石 (1) ;
 該イオンビーム (4) を該ガントリ (5) の回転軸 (7) と平行に曲げるための、第 1 曲
 げ電磁石 (1) の曲げ角度と同じ角度を有する第 2 曲げ電磁石 ;
 該イオンビーム (4) をガントリ (5) の回転軸 (7) と該イオンビーム (4) の交わり
 (6) [該交わり (6) ポイントはイソセンタ (10) と呼ばれる] に向けて曲げるため
 の、回転軸 (7) に対して 45 ° ~ 90 ° の範囲の曲げ角度を有する第 3 曲げ電磁石 (3
) ;

を含むイオン光学システムを有するガントリであって、

該ガントリは、さらに、

ビーム方向に垂直な平面で該イオンビーム (4) の水平走査を行うための、該第 3 曲げ電
 磁石 (3) の上流に位置する水平走査電磁石 (11) ;ビーム方向に垂直な平面で該イオンビーム (4) の垂直走査を行うための、該第 3 曲げ電
 磁石 (3) の上流に位置する垂直走査電磁石 (12) ;ガントリに入射するイオンビームの非対称イオンビームエミッタンスに起因する、出射す
 るイオンビームの回転依存性をなくすための 2 つの四極子電磁石、ビームサイズを制御す
 るための 2 つの四極子電磁石およびアクロマティックなビーム輸送のための 2 つの四極子
 電磁石を含む、該第 1 曲げ電磁石 (1) の下流であって、かつ、該走査電磁石 (11、1

2)の上流に位置する調整可能な励磁を有する少なくとも6つの四極子電磁石(22~27)を含み、

これらの調整可能な四極子電磁石は、

ガントリ入射口(30)からイソセンタ(10)へのアクロマティックなビーム輸送；
既定のビームサイズパターンに従うイソセンタ(10)での該イオンビーム(4)のサイズ制御；および

ガントリ(5)の回転角度から独立した、イソセンタ(10)での該イオンビーム(4)のサイズおよびイソセンタ(10)での該イオンビーム(4)のスポット形をもたらし、
ガントリ(5)は加速器とガントリ(5)を結合する固定ビーム伝達ラインに対して、 $0^\circ \sim 360^\circ$ のいかなる角度でも回転することができ、かつ、該固定ビーム伝達ラインから出て、該ガントリ(5)へ入る該イオンビーム(4)は、該固定ビーム伝達ラインのイオンビーム(4)に対して垂直な平面における水平方向と鉛直方向で異なったエミッタンスを有することを特徴とし、

それによって、イソセンタ(10)でのイオンビームのシグマ・マトリックスの σ_{11} および σ_{33} が、ガントリの回転角度から独立しているという条件を満たすように、ガントリのイオン光学システムが設計された、ガントリ。

【請求項2】

ガントリの伝達マトリックスの r_{11} および r_{33} は、条件 $r_{11} = r_{33} = 0$ を満たし、かつ、ガントリ入口でのイオンビームのシグマ・マトリックスの σ_{22} および σ_{44} は、条件 $\sigma_{22} = \sigma_{44}$ を満たす、請求項1に記載のガントリ。

【請求項3】

ガントリの伝達マトリックスの r_{12} および r_{34} は、条件 $r_{12} = r_{34} = 0$ を満たし、かつ、ガントリ入口でのイオンビームのシグマ・マトリックスの σ_{11} および σ_{33} は、条件 $\sigma_{11} = \sigma_{33}$ を満たす、請求項1に記載のガントリ。

【請求項4】

前記イオンビーム(4)の磁場中の軌道の剛性は、調整可能な励磁において、少なくとも $1.1 \sim 6.6 \text{ Tm}$ (テスラ×メートル)の範囲であることを特徴とする、請求項1記載のガントリ。

【請求項5】

少なくとも2つの別な四極子(20、21)が、入射するイオンビームの非対称イオンビームエミッタンスに起因する誤差による、出射するビームが受ける(感じる)影響を最小となるビーム輸送システムとするために、第1曲げ電磁石(1)の上流に配置されることを特徴とする、請求項1または請求項4記載のガントリ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明が属する技術分野】

本発明は請求項1の前文に記載されるイオン光学システムを有するガントリに関する。

【0002】

【従来の技術】

このようなガントリのためのイオン光学システムは、プロトンビームを該ガントリの回転軸から曲げるために、米国特許第4,870,287号から公知であるような曲げ角度 90° を有する第1曲げ電磁石を包含する。さらに、第1曲げ電磁石の曲げ角度と同じ曲げ角度を有する第2曲げ電磁石は、該イオンビームを該ガントリの該軸と平行に曲げる。最後に、上記した先行技術によると 90° の曲げ角度を有する第3曲げ電磁石は、該イオンビームを該ガントリの該回転軸と該イオンビームの交わりに向けて曲げる。この交わりはイソセンタと呼ばれる。

【0003】

第1および第2曲げ電磁石の間に2つの四極子電磁石を配置することは、米国特許第4,870,287号から、さらに公知である。第2および第3曲げ電磁石の間にも、2つの他の四極子電磁石を配置する。しかし、このようなガントリの欠点は、もしも非対称イオンビーム

10

20

30

40

50

が固定伝達ラインからガントリ入射口へ導入されたなら、たった4つの四極子を有するようなガントリ内でのビーム輸送は、ガントリ回転の角度に依存することになり、非対称ビームは垂直および水平平面で異なったエミッタンスを有するビームとしての意味を有する。

【0004】

医療用シンクロトロン of 理論的研究ならびに既存施設での測定では、ゆっくりと取り出されたビームは、水平および垂直平面で上記した異なったエミッタンスを有することを示していた。これは回転ガントリへの固定伝達ラインの整合性を複雑にしている。ガントリの水平および垂直平面の入射口ビームパラメータは、ガントリ回転角度の関数となり、もしも特別な注意が払われないなら、この従属性はガントリ射出口のビームパラメータへと変換される。

10

【0005】

これらの欠点を解消するために、ガントリ内で該四極子電磁石に加えて、複数の他の四極子電磁石を含む「回転子」と呼ばれる、特別な整合部分が、M. BenediktとC. Carli, 「医療用シンクロトロンのためのガントリへの整合性」Particle Accelerator Conference PAC '97, Vancouver 1997にて提案された。この回転子は固定伝達ライン内のガントリの上流に配置される。

【0006】

この回転子は、ガントリ上にいかなる特別なイオン光学拘束力を適用しなくても、固定伝達ラインへ回転ガントリを整合させることができる一般的な方法をもたらす。他方、これは伝達ラインの余分な長さ約10mを占め、これは病院へ取り付け極めてコンパクトな医療用加速器複合体の形態としては不利である。さらに、回転子全体はガントリとともに同期的に回転されなければならない。これは、極めて正確な機械的回転のために余分な装置を必要とする。

20

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

したがって、本発明の目的は空間と費用を節約し、かつ、このような回転子を回避することにあり、非対称的イオンビームの輸送と独立したガントリ回転を可能とする。すなわち、イオン光学設定は、たとえビームが水平および垂直平面で異なったエミッタンスでもってガントリへ入ったとしても、ガントリ射出口でビームパラメータをガントリ回転角度から独立させるべきである。

30

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明の目的は、独立請求項1の主題によって達成される。好ましい実施態様は、請求項1に従属する従属請求項に記載される。

【0009】

したがって、イオン光学システムを有するガントリは、さらに、ビーム方向に垂直である平面で該イオンビームの水平走査を行うための、該第3曲げ電磁石の上流に配置する水平走査電磁石；

ビーム方向に垂直である平面で該イオンビームの垂直走査を行うための、該第3曲げ電磁石の上流に配置する垂直走査電磁石；

40

該第1曲げ電磁石の下流であって、かつ、該走査電磁石の上流に位置する調整可能な励磁を有する少なくとも6つの四極子電磁石を含み、

四極子電磁石は、

ガントリ入口からイソセンタへの完全にアクロマチックであるビーム輸送；

既定のビームサイズパターンに従うイソセンタでの該イオンビームのサイズ制御；およびガントリ回転角度から独立した、イソセンタでの該イオンビームのサイズおよびイソセンタでの該イオンビームのスポット形をもたらす、

ガントリは加速器とガントリを結合する固定ビーム伝達ラインにおいて、 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ のいかなる角度でも回転でき、かつ、該固定ビーム伝達ラインから出て、該ガントリへ入

50

る該イオンビームは、該固定ビーム伝達ラインの水平および垂直平面で異なったエミッタンスを有する。

【 0 0 1 0 】

イオンビーム（通常、 $1 \leq Z \leq 8$ ）が癌治療の用途において、好ましい物理的および生物学的性質を有することは周知である。最も適したビーム伝送技術は、特にプロトンより重いイオンでは、加速器からのエネルギー変動および請求項 1 の特徴部分に記載される横方向強度制御ラスト走査を含む、いわゆる活性ビーム走査である。消極的なビーム伝送とは逆に、活性走査システムは患者へ可変的スポットサイズを有する細い鉛筆様ビームを送送し、治療領域上でそれを走査することを目的とする。

【 0 0 1 1 】

ビーム輸送システムによって鉛筆様ビームを形成し、かつ保存することは、ガントリのイオン光学システムにおけるこの場合には、大きな重要性を有する。標的に対する線量の適合性は、もしもビームがいかなる方向から患者へ挿入できるなら、さらに最適化され得る。このことは室内座標系において、水平軸のまわりに回転する該ガントリによって達成される。鉛筆ビーム走査を回転ガントリと組み合わせると、特殊な別のイオン光学問題を引き起こす。

【 0 0 1 2 】

このビームは、伝達ラインの出口、ガントリ入口、およびガントリエイソセンタで、それぞれ、シグマ・マトリックス $\sigma(0)$ 、 $\sigma(1)$ および $\sigma(2)$ で表示される。シグマ・マトリックスは、一般には、下記形式を有する。

$$\sigma(i) = \begin{pmatrix} \sigma(i)_{11} & \sigma(i)_{12} & \sigma(i)_{13} & \sigma(i)_{14} \\ \sigma(i)_{21} & \sigma(i)_{22} & \sigma(i)_{23} & \sigma(i)_{24} \\ \sigma(i)_{31} & \sigma(i)_{32} & \sigma(i)_{33} & \sigma(i)_{34} \\ \sigma(i)_{41} & \sigma(i)_{42} & \sigma(i)_{43} & \sigma(i)_{44} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $i = 0, 1, 2$ であり、個々のマトリックス項は、通常の意味を有する。シグマ・マトリックスは、現実の正定符号であって、かつ、対称的マトリックスである。シグマ・マトリックスの対角項の平方根は、 x, x', y および y' 座標におけるビームサイズの測定値である。ここで、 $[x, x', y, y']$ は、シグマ・マトリックスによって特徴つけられた四次元楕円面の内側の体積をビームが占める四次元位相空間である。オフ・対角項は、位相空間内の楕円の方向性を決定する。伝達ラインの出口で、いわゆる未結合ビームが予想され、すなわち、2つの横方向位相空間、 $[x, x']$ および $[y, y']$ の間に相関関係は存在しない。このような場合、水平および垂直相を結合するシグマ・マトリックスの要素はゼロになる。これらの性質を考慮すれば、伝達ラインの射出口でのビームのシグマ・マトリックスは単純な形式で記載され得る：

$$\sigma(0) = \begin{pmatrix} \sigma(0)_{11} & \sigma(0)_{12} & 0 & 0 \\ \sigma(0)_{21} & \sigma(0)_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma(0)_{33} & \sigma(0)_{34} \\ 0 & 0 & \sigma(0)_{43} & \sigma(0)_{44} \end{pmatrix} \quad (2)$$

【 0 0 1 3 】

もしもガントリが角度 α でもって、固定伝達ラインにおいて回転するなら、ガントリ入口でのビームのシグマ・マトリックス、 $\sigma(1)$ は、下記変換式によって示されるであろう：

$$\sigma(1) = M_\alpha \cdot \sigma(0) \cdot M_\alpha^T \quad (3)$$

ここで、 M_α^T は角度 α によって座標系の回転を記述し、下記式を有する M_α に対する転置マトリックスである。

$$M_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

【 0 0 1 4 】

ガントリのビーム輸送系は、その伝達マトリックス M_{GAN} によって特徴つけられる。

$$M_{GAN} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & 0 \\ r_{21} & r_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & r_{43} & r_{44} \end{pmatrix} \quad (5)$$

【 0 0 1 5 】

伝達マトリックス M_{GAN} は、 $\det M_{GAN} = 1$ (6) の条件を充足しなければならない。ガントリ光学自体における水平および垂直平面間に結合が存在しないことは、等式 (5) において既に仮定されている。適当な項はゼロにセットされている。さらに、ガントリのビーム輸送系は、ガントリイソセンタでアクロマティックであると仮定されている。($D_{ISO} = 0$ 、 $D'_{ISO} = 0$ (7, 8))、ここで、 D_{ISO} はガントリイソセンタでの分散関数である。) これは分散関数に関する項がなくても、伝達マトリックス M_{GAN} を 4×4 形として書くことができる。ガントリイソセンタでのビームのシグマ・マトリックス、 $\sigma(2)$ は、下記関係式で示される：

$$\sigma(2) = M_{GAN} \cdot \sigma(1) \cdot M_{GAN}^T \quad (9)$$

ガントリ中のアクロマティックなビーム輸送もまた、ガントリ回転角度とは独立していなければならない。これは、もしも分散関数およびその誘導体がガントリ入口でゼロにセットされるなら、達成され得る。これは伝達ライン上のイオン光学拘束力へ翻訳され、その出口でイオン分散フリー領域を形成する。

【 0 0 1 6 】

ガントリイソセンタでのビームパラメータは全てがガントリ回転軸から独立していなくてもよい。腫瘍照射線として、これは両縦方向平面におけるビームサイズおよびビームスポット形において、角度の独立を達成するに充分である。丸いビームスポットが必要である。シグマ・マトリックス数形式的形式言語では、これらの要件は、下記のように記載され得る。

$$\sigma(2)_{11} = \sigma(2)_{33} \neq f(\alpha) \text{ AND } \sigma(2)_{13} = 0 \neq f(\alpha) \quad (10)$$

さらに、ビームサイズは直径 4 ~ 10 mm に調整可能でなければならない。

【 0 0 1 7 】

基本的前提を列挙した後、我々はガントリ回転軸角度へのガントリイソセンタでのビームパラメータの従属性を調査することを進めることができる。伝達ラインの出口からガントリイソセンタへの全体の変換を表現するために、等式 (3) および (9) を組み合わせると便宜的である。

$$\begin{aligned} \sigma(2) &= M_{GAN} \cdot \sigma(1) \cdot M_{GAN}^T = M_{GAN} \cdot M_{\alpha} \cdot \sigma(0) \cdot M_{\alpha}^T \cdot M_{GNA}^T \\ &= M_{OVER} \cdot \sigma(0) \cdot M_{OVER}^T \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 M_{OVER} は下記関連式によって示される伝達ラインの出口からガントリイソセンタへの全体的伝達マトリックスである。

$$M_{OVER} = M_{GAN} \cdot M_{\alpha} \quad (12)$$

【 0 0 1 8 】

マトリックス M_{α} はガントリ回転角度 α に従属する項を含むから (等式 (4) 参照)、これらの項は変換式 (11) によりガントリイソセンタ $\sigma(2)$ のビームのシグマ・マトリックス (11) へも「進入」する。1つはマトリックス増倍式 (11) から得られる。

$$\begin{aligned} \sigma(2)_{11} &= r_{11}^2 \cdot [\sigma(0)_{11} \cos^2 \alpha + \sigma(0)_{33} \sin^2 \alpha] + 2 r_{11} r_{12} \sigma(0)_{12} \cos^2 \alpha + r_{12}^2 \cdot [\sigma(0)_{22} \cos^2 \alpha + \sigma(0)_{44} \sin^2 \alpha] \\ &+ 2 r_{11} r_{12} \sigma(0)_{34} \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

等式 (13) の α を含む項を取り除くことが実現可能であること、およびそのようにする数種の方法が存在することを見出すことは興味深い。その場合、等式 (13) は、もしも、 $r_{11} = 0$ AND $\sigma(0)_{22} = \sigma(0)_{44}$ であるなら、

$$\sigma(2)_{11} = r_{12}^2 \cdot \sigma(0)_{22} \neq f(\alpha) \quad (14)$$

または

$$\begin{aligned} &\text{もしも、} r_{12} = 0 \quad \text{AND} \quad \sigma(0)_{11} = \sigma(0)_{33} \text{ であるなら、} \\ &\sigma(2)_{11} = r_{11}^2 \cdot \sigma(0)_{11} \neq f(\alpha) \quad (15) \end{aligned}$$

となる。

【0019】

同じセットの拘束力が、ガントリの垂直平面で得られ得る。

$$\{r_{33} = 0 \quad \text{AND} \quad \sigma(0)_{22} = \sigma(0)_{44}\} \quad 10$$

$$\text{OR} \quad \{r_{34} = 0 \quad \text{AND} \quad \sigma(0)_{11} = \sigma(0)_{33}\}$$

(16)

【0020】

xy 相関項 $\sigma(2)_{13}$ は、

$$\begin{aligned} \sigma(2)_{13} = & \sin \alpha \cos \alpha \cdot [r_{11} r_{33} (\sigma(0)_{33} - \sigma(0)_{11}) + r_{11} r_{34} (\sigma(0)_{34} - \sigma(0)_{12}) + r_{12} r_{34} (\sigma(0)_{44} - \sigma(0)_{22}) \\ & + r_{12} r_{33} (\sigma(0)_{34} - \sigma(0)_{12})] \end{aligned}$$

(17)

であろう。

【0021】

もしも下記拘束力が満たされるなら、 $\sigma(2)_{13} = 0 \neq f(\alpha)$ の条件を満足する。

$$\{r_{11} = 0 \quad \text{AND} \quad r_{33} = 0 \quad \text{AND} \quad \sigma(0)_{22} = \sigma(0)_{44}\}$$

OR

$$\{r_{12} = 0 \quad \text{AND} \quad r_{34} = 0 \quad \text{AND} \quad \sigma(0)_{11} = \sigma(0)_{33}\}$$

【0022】

上記イオン光学拘束力間の論理的関係は、表 1 に概略される。

好ましい実施態様および本発明のさらなる利点は、添付する図面に基づいてより詳細にここに記載される。

【0023】

図 1 はガントリの配置図である。

図 2 は 2 つの有意なガントリ位置におけるガントリのビーム包絡線の図である。

図 3 はガントリ回転角度の関数としてのガントリのビーム包絡線の図である。

図 4 は走査電磁石の作用の説明図である。

【0024】

上記マトリックス解析は、コンピュータシミュレーションにより行う。拘束力はイソセンタの正常導電性ガントリ上に適用される。その配置は図 1 に示され、ここで、参照番号 20 ~ 27 は四極子電磁石を示し、1 および 2 は第 1 および第 2 曲げ電磁石として 42° の曲げ電磁石をそれぞれ示し、3 は第 3 曲げ電磁石として 90° 曲げ電磁石を示し、4 はイオンビームを示し、7 はガントリ 5 の回転軸を示し、10 はイソセンタを示し、30 はガントリ入口を示し、6 はイソセンタ 10 でのイオンビーム 4 と軸 7 との交わりを示す。11 は水平スキャナを示し、12 は垂直スキャナを示し、13 は入射口極面 15 の 30° 回転を示し、かつ、14 は射出口極面 16 の 21° 回転を示す。

【0025】

入射口ビームエミッタンスは、2 つの横方向平面において、 $\varepsilon_x = 5 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ および $\varepsilon_y = 1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ であり、運動量幅は $\Delta p / p = 0.2\%$ である。シミュレーションは、これが要求されるイオン光学拘束力に適合し、かつ、 $\sigma(0)_{22} = \sigma(0)_{44}$ (表 1 の左欄) の条件を満足する小さな発散量を有する入射口ビームにおける満足すべきビーム集束を達成することを示す。図 2 a および 2 b は、ガントリ回転角度が 90° 異なる 2 つの有意なガントリ配置におけるガントリ 5 のビーム包絡線 40 および 41 を示す。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 6 】

図 2 a) は、ガントリがその水平平面で最小エミッタンスを有するビームを輸送する場合の状況である。図 2 b) はガントリがその垂直平面で最小エミッタンスを有するビームを輸送する場合の状況である。参照番号 2 0 ~ 2 7 は四極子を示し、1 および 2 は 4 2 ° 曲げ電磁石を示し、3 は 9 0 ° 曲げ電磁石を示し、上部プロット 4 0 はガントリ 5 の水平平面を示し、下部プロット 4 1 はガントリの垂直平面を示し、かつ、点線 4 2 が分散関数を示す。

【 0 0 2 7 】

1 つの位置で、ガントリ 5 の水平平面は最大エミッタンスを有するビーム 4 を輸送し、他の位置では、ガントリ 5 の水平平面は最小エミッタンスを有するビーム 4 を輸送する。

10

【 0 0 2 8 】

ビーム輸送の角度独立性を証明するために、下記図 3 は、全てのビーム包絡線がガントリ回転角度 1 0 ° 増加する毎に、これら 2 つのガントリ位置間に存在することを 1 つのプロットにて示す。これらのプロットは、4 mm のアウトプットビーム (図 3 a) および 1 0 mm のアウトプットビーム (図 3 b) において示され、 $\varepsilon_x / \varepsilon_y = 5$ である。図 3 に対応するガントリのイオン光学設定は、表 2 に列挙される。参照記号は図 2 a および図 2 b で示されるものと同じである。プロットの解像能を増加させるために、第 3 曲げ電磁石 3 の開口は釣合いを外れている (out of scale) 。

【 0 0 2 9 】

ビームサイズ制御は、この作業への伝達ラインに関与することなく、ガントリ光学によって専ら行う。これは、伝達ラインがガントリイソセンタ 1 0 で要求されるビームサイズにかかわらず、同じアウトプットパラメータを有するビームを常にその射出口で形成することを意味する。ガントリ四極子 2 2 ~ 2 7 の異なった設定は、イソセンタ 1 0 でビームサイズを制御するために利用される。図 3 に示される 2 つの極端な実施例のほかに、全ビーム直径 4 ~ 1 0 mm において 1 mm 毎にシミュレーションが行われた。

20

【 0 0 3 0 】

図 4 は走査電磁石 1 1 および 1 2 の作用を説明する。走査電磁石 1 1 および 1 2 は、第 3 曲げ電磁石 3 の上流であって、最後の四極子レンズ 2 7 の下流に配置される。この位置はイオン光学の観点から最適であると判断された。第 3 ガントリ電磁石 3 の入射口および射出口の極面 1 5 および 1 6 のエッジ集束は、平行走査モードをほぼ達成するために使用される。理想的な平行走査からの偏角は、1 0 cm の最大ビームずれで 0 . 2 ° である。走査フィールドは $20 \times 20 \text{ cm}^2$ である。入射口および射出口の極面回転角度 1 3、1 4 (図 1 に示される) は、それぞれ 3 0 ° および 2 1 ° である。図 4 の上部は、水平平面 1 1 1 および第 3 曲げ電磁石 3 の曲げ範囲に示される水平走査 1 1 によって生じるビーム偏向 5 0 を示す。図 4 の下部は水平平面 1 1 2 および第 3 曲げ電磁石 3 の曲げ範囲に示される垂直走査 1 2 によって生じるビーム偏向 6 0 を示す。

30

【 0 0 3 1 】

本発明の解決策は、表 1 に列挙される要求イオン光学拘束力を満足することができるガントリのみを使用できる。このようなガントリは、適当な数の可変要素、本発明に従えば、調節可能な励磁を有する少なくとも 6 つの四極子電磁石を有していなければならない。本発明は、6 つのイオン光学拘束力：アクロマティック輸送のために 2 つ、回転独立性を得るために 2 つおよびビームサイズ制御のために 2 つを全て一緒に使用する。これは、本発明に従えば、四極子の最小数は 6 であることを意味する。表 2 から明らかなように、好ましい実施態様は最小数に比べて、ある冗長性をもたらす 8 つの四極子を含む。しかしながら、この冗長性は変数が任意の数に設定され得ない、あるシステムの現実的デザインにおいては利点を有する。四極子極先端の磁性線束密度は物理的に限定され (その限界は好ましい実施態様では 0 . 8 T に設定される)、もちろん、ガントリ内側のビーム包絡線は、ビーム輸送要素の開口ができるだけ小さくなるような方法で制御されるべきである。さらに、この冗長性はビーム輸送システムの誤った感度を最小限にするために使用され得る。

40

【 0 0 3 2 】

50

ガントリ伝達マトリックスの適当な項をゼロに設定して、ガントリイソセンタでビームパラメーターからガントリ回転角度含有項を除去することは、2つの横方向平面におけるいかなるエミッタンスの差異においても有効であることに注目すべきである。実際に、これは全く ε_x / e_y 比に全く依存しない。その計算は $\varepsilon_x / e_y = 5$ および $\varepsilon_x / e_y = 10$ において実施された。これは先行技術から公知である測定値よりもより大きい。しかしながら、極端に大きなエミッタンス比では、イソセンタで等しいビームスポットサイズを得るか、合理的な開口内のガントリ内側にビーム包絡線を保つか、あるいは結合点で適当なビームを形成する問題に誰しも遭遇する。これらの問題は、 $\varepsilon_x / e_y > 15$ において生じる。

【0033】

10

また、回転独立ビーム輸送を達成するために、ガントリ拘束力のセットにたった2つ以上のイオン光学拘束力、いわゆる $r_{11} = r_{33} = 0$ または $r_{12} = r_{34} = 0$ を追加されなければならないことは、本発明の興味深い事実である。アクロマティックなビーム輸送およびビームサイズ制御のための他の拘束力は、とにかく充足されなければならない。

【0034】

曲げ電磁石は2 Tまでの磁場を使用するように仮定されている。しかし、電磁石の傾斜中にある飽和関連動的効果为了避免するためには、1.8 Tへ磁場を低下させることが実現可能である。しかしながら、この変化は本発明の回転独立ビーム輸送の概念に何等影響を与えない。

【0035】

20

ガントリ設定がガントリ回転角度の関数である場合には、ガントリ5をあるモードに取り付けることは、確かに可能性がある。しかしながら、このようなモードはビームサイズの関数、さらにガントリ回転角度の関数として、全ての設定を保存する大きなデータセットを必要とする。ビームエネルギーと粒子種の関数として、異なった設定を有する必要性も存在する。したがって、ガントリ回転角度への依存性を除去することは、大きな利点である。これは100のファクター(90° - ガントリ回転の1つの四極子、1° - ガントリ位置の角度解像)によりデータ量をおおよそ低下させる。

【0036】

非対称ビームのガントリ回転独立ビーム輸送となるイオン光学拘束力間の論理的関係と要約は、表1に示される。イオン光学拘束力の2つの可能性あるセットは、表1の2つのカラムに示される。論理的「OR」はこれらの2つのカラムの間で使用され、一方、論理的「AND」は所与のカラム内の拘束力間を結合する。

30

【0037】

【表1】

伝達ライン

常にアクロマティック：伝達ラインの射出口で $D = 0$ AND $D' = 0$

ガントリ

常にアクロマティック： $r_{16} = 0$ AND $r_{26} = 0$

$\sigma(0)_{22} = \sigma(0)_{44}$ AND $r_{11} = 0$ AND $r_{33} = 0$

OR $\sigma(0)_{11} = \sigma(0)_{33}$ AND $r_{12} = 0$ AND $r_{34} = 0$

40

【0038】

図3に示される回転独立ビーム輸送に対応するガントリ設定は、表2に列挙される。下記略号が使用される。 L_{eff} = 四極子の効果長、 A_p = 四極子極開口の半径、 B = 四極子極先端の磁性流速密度(「-」は垂直フォーカス)、 B_{BEND} = 双極子電磁石の磁性流速密度、 IR = 入射口極面回転角度、 ER = 射出口極面回転角度、 d = ドリフト長。全ての曲げ電磁石は場勾配がないように設計されている。すなわち、 $N = 0$ である。

【0039】

【表2】

要素	設定		
	物理的パラメーター	4 mmビーム	10 mmビーム
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = -0.364 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = +0.210 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
42° 曲げ電磁石	$B_{\text{BEND}} = 2 \text{ T}$	$I R = 0^\circ$	$E R = 0^\circ$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = +0.318 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.9 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = +0.445 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = +0.281 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.9 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = -0.066 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
42° 曲げ電磁石	$B_{\text{BEND}} = 2 \text{ T}$	$I R = 0^\circ$	$E R = 0^\circ$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 4 \text{ cm}$	$B = -0.109 \text{ T}$
ドリフト	$d = 0.5 \text{ m}$		
四極子	$L_{\text{eff}} = 0.3 \text{ m}$	$A p = 3 \text{ cm}$	$B = +0.567 \text{ T}$
走査システムにおけるドリフト	$d = 2.8 \text{ m}$		

【図面の簡単な説明】

【図 1】 ガントリの配置図である。

【図 2 A】 2つの有意なガントリ位置におけるガントリのビーム包絡線の図である。

【図 2 B】 2つの有意なガントリ位置におけるガントリのビーム包絡線の図である。

【図 3 A】 ガントリ回転角度の関数としてのガントリのビーム包絡線の図である。

【図 3 B】 ガントリ回転角度の関数としてのガントリのビーム包絡線の図である。

【図 4】 走査電磁石の作用の説明図である。

【符号の説明】

1、2：第1および第2曲げ電磁石として42°の曲げ電磁石

3：第3曲げ電磁石として90°曲げ電磁石

4：イオンビーム

5：ガントリ

6：イソセンタ10でのイオンビーム4と軸7との交わり

7：ガントリ5の回転軸

10：イソセンタ

11：水平スキャナ、走査電磁石

111：水平平面

112：水平平面

12：垂直スキャナ、走査電磁石

13：入射口極面15の30°回転

14：射出口極面16の21°回転

10

20

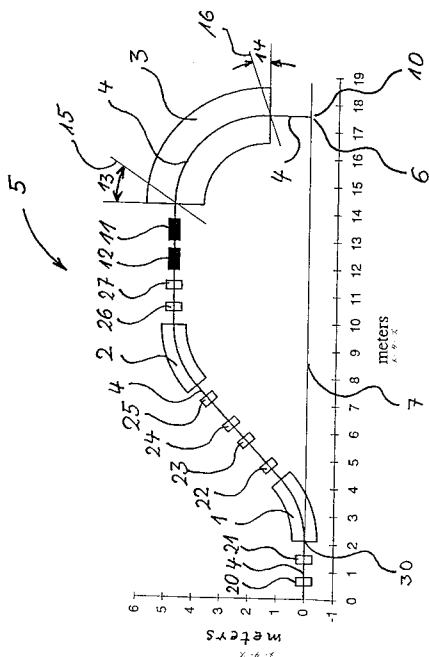
30

40

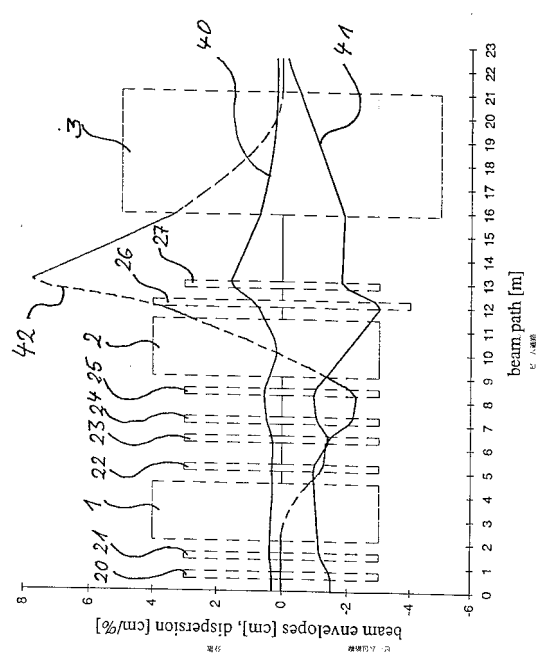
50

- 15 : 入射口および射出口の極面
- 16 : 入射口および射出口の極面
- 20 ~ 27 : 四極子電磁石
- 27 : 四極子レンズ
- 30 : ガントリ入口
- 40 : ガントリ5の水平平面
- 41 : ガントリの垂直平面
- 42 : 分散関数
- 50 : ビーム偏向
- 60 : ビーム偏向

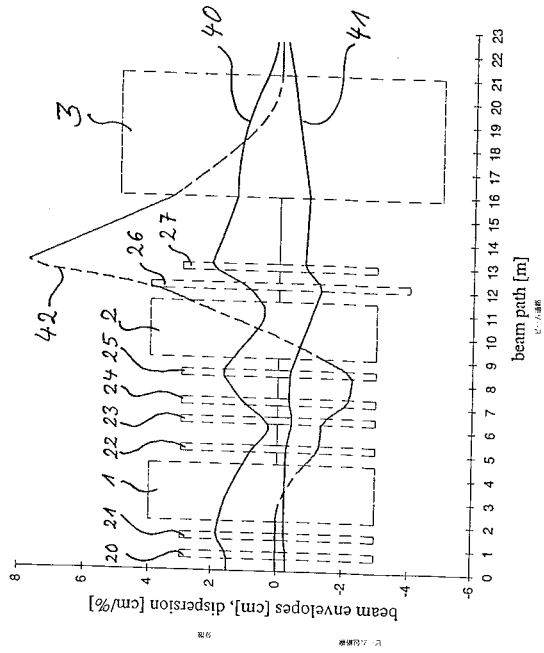
【図1】



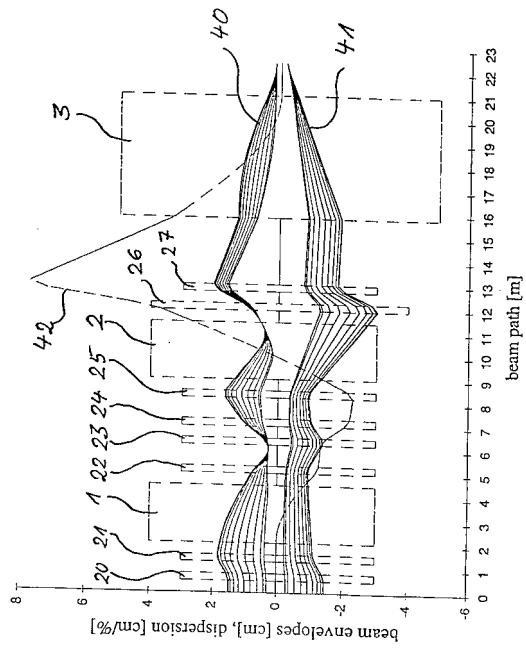
【図2A】



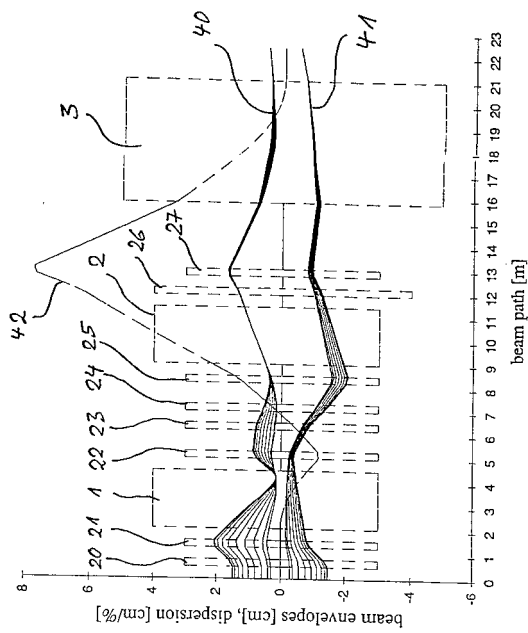
【図 2 B】



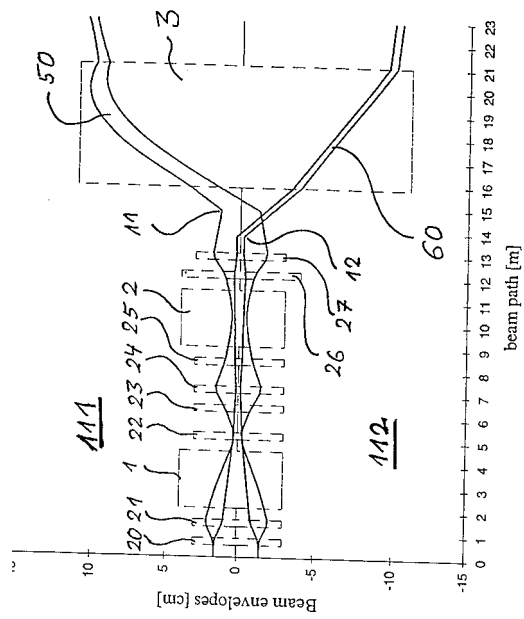
【図 3 A】



【図 3 B】



【図 4】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
 G 2 1 K 1/093 S
 G 2 1 K 5/10 M

(72)発明者 マリウス バプロビック
 ドイツ、D - 6 4 2 9 1 ダルムスタット、プランクストラッセ 1

審査官 林 靖

(56)参考文献 特開平 0 6 - 2 1 4 1 0 0 (J P , A)
 特開平 0 9 - 2 6 5 0 0 0 (J P , A)
 特開平 1 0 - 2 8 2 3 0 0 (J P , A)
 特開平 1 1 - 1 4 2 6 0 0 (J P , A)
 特開平 0 8 - 1 3 8 9 0 0 (J P , A)
 H. Eickhoff, et. al, , The proposed Accelerator Facility for Litht Ion Cancer Therapy i
 n Heidelberg , Proceedings of the 1999 particle Accelerator Conference, New York , 米国
 , IEEE , Vol. 4 , page 2513-2515
 H. Eickhoff, et. al , The Proposed Accelerator Facility for Light Ion Cancer Therapy in
 Heidelberg , 1999 Particle Accerlerator Conference, New York City , 米国 , IEEE , 1 9 9
 9 年 3 月 3 1 日 , ポスターセッション U 0 6
 M. Paclovic , Beam-optice Study of the Gantry Beam Delivery System for Light-ion Cancer
 Therapy , Nuclear Instrument & Methods in Physics Research, A. , Elsevier , 1 9 9 7 年 1
 1 月 , Vol. 399 , page 439-454

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G21K 5/04
 A61N 5/10
 G21K 1/093
 G21K 5/10