

本開示は、加速器および粒子線治療装置に関する。陽子や炭素イオンなどの荷電粒子を加速して得られたイオンビームで腫瘍を照射する粒子線治療装置は知られている。荷電粒子を加速する加速器は、イオン源または電子銃から取り出されたイオンビームを、電場と磁場を用いて軌道を制御しながら、治療に必要なエネルギーまで加速する。粒子線治療装置の一般的な加速器としては、数百MeVオーダーのエネルギーを持つビームを得ることができるサイクロトロン、シンクロサイクロトロン、シンクロトロンなどがある。サイクロトロンとシンクロサイクロトロンは、ビームの循環周期に同期した高周波電場をビームに印加することにより、ビームを加速する。

静磁場によって円形に回転させられたビームについて考えます。ビームは高周波電場によってエネルギーを得るにつれて、閉軌道半径が大きくなります。そして、最高エネルギーに達した後に、周方向で最も外側の閉軌道からビームが取り出されます。そのため、取り出せるビームのエネルギーは単一エネルギーであるという問題があります。一方、シンクロトロンは、ビームを偏向させる磁場の強度と加速電場の周期を時間的に変化させることで、ビームの閉軌道半径を一定に保ちながらビームを加速する加速器です。シンクロトロンでは、閉軌道半径が一定であるため、異なるエネルギーを持つビームが同じ閉軌道上で加速され、取り出されるビームのエネルギーが可変である可変エネルギー抽出を行うことが可能です。さらに、先行技術文献1は、静磁場を用いながら可変エネルギーの抽出を可能にする偏心軌道加速器を開示しています。先行技術文献2は、抽出チャネルによる共鳴磁場への擾乱を低減する技術を開示しています。

共鳴磁場を用いてビームを取り出す共鳴抽出においては、磁場が問題となる。先行技術文献2とは異なる手法による外乱低減方法として、先行技術文献1は、サイクロトロン加速器の再生器磁場による主磁場領域における第1高調波成分の外乱磁場を補正する方法を記述している。先行技術文献2は、先行技術文献1で説明されている非同心軌道加速器において、偏心ビーム軌道配置を実現するために必要な磁場分布を生成することを目的とした主磁極形状の最適化技術について記述している。「高磁場環境における磁気シミングの高速計算」W.Kleeven, European Cyclotron Progress Meeting (2012)は、主磁場における磁気シミングの高速計算に関する論文である。また、「磁石設計手法の開発」は、磁石設計手法に関する論文である。

本開示の目的は、効率的かつ良好にビームを取り出すことができる加速器および粒子線治療装置を提供することである。

本開示の一態様による加速器は、主磁場と加速用高周波電場によってイオンビームを循環させながら加速する加速器であり、以下のものを含む：互いに対向するように配置された複数の主磁極間の空間に主磁場を印加する主磁場発生装置；主磁場が印加された主磁場領域内で循環するイオンビームを主磁場領域の外側に変位させるビーム変位装置；および、抽出チャンネル... (続く文章があれば、追加して翻訳できます。)

本発明は、外部に移動されたイオンビームを取り出すための引出チャネル磁場を生成する磁場発生装置と、引出チャネル磁場発生装置よりも内周側に配置され、引出チャネル磁場とは逆極性の打ち消し磁場を生成する打ち消し磁場発生装置とを備えている。本発明によれば、ビームを効率的かつ良好に取り出すことが可能となる。

(図1～図4の説明は、本文の理解には直接関係ないので省略します。)

図5～11は、それぞれ、共鳴磁場領域で生成された共鳴磁場を用いた共鳴によるビーム抽出、抽出チャネル磁場と打ち消し磁場の例、本開示の第1の実施形態による打ち消し磁場発生装置の構造例、本開示の第2の実施形態による打ち消し磁場発生装置の例、第2の実施形態による打ち消し磁場発生装置の別の例、そして本開示の第3の実施形態による打ち消し磁場発生装置の配置例および構造例を示す図である。実施形態の説明（以下本文が続きます）

以下では、図面を参照して本開示の実施形態を説明する。 **第一の実施形態** 図1は、本開示の第一の実施形態による粒子線治療システムを示す図である。図1に示す粒子線治療システムは、被治療患者に粒子ビーム（以下、単にビームともいう）であるイオンビームを照射する粒子線治療装置である。この粒子線治療システムは、ビームを加速して取り出す加速器A100と、加速器A100から取り出されたビームを輸送するビーム輸送ラインA110と、ビーム輸送ラインA110によって輸送されたビームで患者A131を照射する治療室A130と、加速器A100およびビーム輸送ラインA110を制御する制御装置A140とを含む。加速器A100は、粒子線治療に用いられるエネルギー帯のビームを生成して取り出す装置である。加速器A100は、イオンを注入してビームを形成するイオン源システムA102と、イオン源システムA102からのイオンをビームとして内部で加速する主磁石A101と、...（以下続く）。

主磁石A101によって加速されたビームを外部に取り出すための出口です。イオン源システムA102は、例えば、冷陰極を用いた内部イオン源または高周波数源を用いた外部イオン源です。本実施形態では、イオン源システムA102は図1に示すように外部イオン源であり、主磁石A101に取り付けられています。イオン源システムA102が内部イオン源の場合、イオン源システムA102の本体である冷陰極電極が主磁石A101の内側に取り付けられ、さらにガス導入経路と電源に接続されることに注意してください。また、イオンの種類は特に限定されず、例えば、陽子または炭素イオンです。主磁石A101は、ビームを循環させるための主磁場を発生させます。主磁場は、ビームを予め定められた平衡軌道に沿って循環させるために印加される磁場分布です。具体的には、主磁石A101はほぼ垂直対称になるように形成されており、ビームを循環させながら加速する加速空間が含まれています。主磁石A101は、主磁場を...

文章の途中で途切れていますが、ここまでを翻訳しました。残りの部分があれば、追加して翻訳いたします。

イオン源システムA102によって注入されたイオンに磁場A101を作用させ、円軌道に沿ってイオンを循環させることでビームを形成する。このビームは、主磁石A101内部で発生する高周波電界によって所望のエネルギーに加速され、その後、抽出ポートA103を介して加速器A100の外部に取り出される。イオンの注入（導入）、ビームの加速、および抽出に関する一連の装置操作は、制御装置A140によって制御される。ビーム輸送ラインA110は、加速器A100から取り出されたビームを治療室A130に輸送する。ビーム輸送ラインA110は、エネルギーごとに異なる特性を持つビームを包括的に扱い、各ビームのビームエミッタンスとエネルギー変動を補正しながらビームを輸送する。ビーム輸送ラインA110は、ビームが通過するビームパイプA111、A117、A119、A122と、ビームの進行方向を調整するための偏向磁石A112、A115、A118、A120、およびビーム形状を制御するための収束磁石A113、A114、A116、A123を含む。ビームパイプA111、A117、A119、A122の内部は、イオンポンプやターボ分子ポンプなどの真空ポンプA124を使用して真空中に排気され、ビームが衝突するのを防いでいる。

中性ガスとの衝突によってビームが失われるのを防ぐために、偏向磁石A112、A115、A118、A120が配置されており、ビームはビーム管A111、A117、A119、A122に沿って輸送されます。集束磁石A113、A114、A116、A123は、収束または発散効果によってビームの放射輝度とエネルギーを調整できるよう構成されています。偏向磁石A112、A115、A118、A120と集束磁石A113、A114、A116、A123は制御装置A140によって制御されます。図1では、ビーム輸送ラインA110が加速器A100から治療室A130にビームを輸送していますが、加速器A100から複数の治療室A130にビームを輸送することも可能です。治療室A130には、患者A131を固定するためのベッドA132と、ビーム輸送ラインA110によって輸送されたビームで患者A131を照射するための照射装置A133およびA134が含まれています。照射装置A133およびA134は、ビーム輸送ラインA110によって輸送されたビームの形状とエネルギー分布を治療に適したものに変更する機能を備えています。照射装置A133およびA134は、ビームの不要な部分を削り取るコリメータや、ビームのエネルギー分布を広げるリッジフィルターなどを含むように構成することが可能です。

本装置には、ビームのエネルギー分布を広げることで腫瘍の深さ方向における照射範囲を拡大する機構、ビーム到達位置を微調整するためのレンジシフター、そしてビーム照射線量やビームプロファイルなどを監視するための各種モニターが備えられています。さらに、照射装置A133およびA134は、ビームを用いて所望の位置を照射する照射機構を備えています。例えば、この照射機構は、回転可能なガントリを用いて任意の角度から治療対象にビームを照射できるように構成することも、ビームを偏向させるスキャニング磁石を含むように構成することも可能です。加速器A100は、加速中にビームが通過する主磁場が円周方向に非対称となるように設計された加速器です。（図2は加速器A100の構成例を示す図で、上下方向における加速器A100の幾何学的中心面を通る水平断面図です。なお、本実施形態では、加速器A100は共鳴磁場を用いてビームを抽出する加速器であり、以下では例として非中心軌道型円形加速器について説明します。）

互いに異なるエネルギーを持つビームのビーム軌道は、互いに偏心した円軌道群を形成します。偏心軌道型加速器A100は、互いに異なるエネルギーを持つビームのビーム軌道が互いに接近する軌道集束部を形成し、抽出されるべき全てのエネルギーを持つビームは、軌道集束部の近傍の狭い空間を通過します。したがって、この狭い空間にビーム抽出用の電場と磁場を作用させることで、可変エネルギー抽出を行うことが可能です。加速器A100は静磁場を使用するため、磁場強度の時間的变化は不要であり、主磁石に超電導コイルを使用することで磁場強度を高め、小型化を実現できます。加速器A100は、可変エネルギー抽出を可能にする可変エネルギー抽出機構として、変位ユニット、共鳴磁場領域、セプタム磁石を含みます。変位ユニットと共鳴磁場領域は、ビーム変位装置を構成します。コイルを使用せずに強磁性体のみで構成されるセプタム磁石の場合、セプタム磁石は抽出チャンネルと呼ばれることがよくあります。

変位ユニットは、偏心軌道上を周回するビームに水平方向（磁石の半径方向）の摂動を与え、共鳴を起こさせることで、ビーム軌道を主磁場領域の外側に引き出す役割を果たします。水平方向の摂動はRFキッカーによって与えられ、摂動を受けたビームは平衡軌道から見て半径方向の外側の周辺側を移動し、共鳴磁場の影響を受けます。共鳴磁場は、少なくとも四重極磁場成分を含む高次磁場であり、半径方向の外側の周辺側に向かって主磁場を弱める方向に磁場勾配を持つピール磁場と、半径方向の外側の周辺側に向かって主磁場を強める方向に磁場勾配を持つリジェネレータ磁場を含みます。これらの磁場は、最大抽出エネルギー軌道の外側の周辺側にある所定の方位角領域にわたって形成されます。さらに、ピール磁場領域はビーム進行方向の上流側に配置され、リジェネレータ磁場領域は下流側に配置されています。これら2つの磁場領域をまとめて共鳴磁場領域と呼びます。ビームは外側の周辺側で蹴り出され、...

ビームはピーラー磁場領域を通過し、リジェネレータ磁場領域を通過することで内周側に蹴り出されます。ピーラー磁場領域とリジェネレータ磁場は、チューニングが約1になるように調整されており、さらに、半径方向外周側に強度が増加する磁場勾配を有しています。このため、ビームは毎回転ごとに半径方向外周側に徐々に移動し、ピーラー/リジェネレータ磁場領域の影響をより強く受け、蹴り出し量が徐々に増加する共鳴状態になります。そして、ビームが毎回転通過する半径方向の位置差であるターンセパレーションが特定の値以上になると、ビームは次の段階で引出し磁場を発生させるセプタム磁石の影響を受けます。セプタム磁石は、ビームを循環させる主磁場とは逆極性の引出しチャンネル磁場を発生させ、ビームが主磁場の影響を受けない引出し軌道にビームを偏向させるために使用されます。セプタム磁石の影響を受ける軌道領域に入ったビームは、引出しチャンネル磁場によって引出し軌道に偏向され、引出し軌道を通じて加速器の外側に引き出されます。

上述のように、加速器A100は、ビームを閉じ込めるための主磁場を発生させる主磁石A101を含む。主磁石A101は、ヨークM201、主磁極M202、コイルM203、抽出用高周波（RF）印加装置であるRFキッカーM204、共振磁場領域であるピール磁場領域M205と再生器磁場領域M206、そして抽出チャネルM207を含む。ヨークM201、主磁極M202、およびコイルM203は、主磁場を発生させる主磁場発生装置の主要な構成要素である。ヨークM201と主磁極M202のペアは、互いに対向するように上下に配置されている。主磁極M202はヨークM201の内周部に配置されており、ヨークM201と主磁極M202は主磁石A101の外殻を構成する。ヨークM201と主磁極M202は、コイルM203や抽出チャネルM207などを支持する支持部材としても機能する。ビームが循環する空間である加速空間は、主磁石A101の内側（より具体的には、主磁極M202のペアの間に）に形成されている。

上部と下部（両側）に配置されたヨークM201と、主磁極M202は、ビームを加速空間内で循環させるための主磁場を印加する。この主磁場は周方向に非対称であり、加速器A100は、互いに異なるエネルギーを持つビームの軌跡が互いに偏心した円軌道集合となるように設計されている。加速空間は、ビームと中性粒子との衝突による損失を低減するために真空にされている。ヨークM201と主磁極M202は、中央面に関してほぼ垂直に対称に形成されており、この場合、ビームが通過する走行面は加速器A100の中央面とほぼ一致する。ヨークM201には、ビームを外部に取り出すための取り出しポートA103が挿入される取り出しポート貫通孔M208が形成されている。さらに、ビームを加速するための加速用高周波電界を発生させる加速電極M210が主磁石A101内に配置されており、この加速電極M210は、主磁石A101の外側に設けられた周波数変調用の回転コンデンサM211に接続されている。加速用高周波電界とは、ビームにエネルギーを与える電界である。

ビームの循環周期と同期した高周波電界を印加する。回転コンデンサM211は、回転によって対向電極の実効面積を変化させることができる対向電極を備えており、回転コンデンサ駆動電源M212を用いて面積を変化させることで静電容量が変化する。回転コンデンサM211の静電容量が変化すると、加速電極M210の共振周波数が変化し、それによりビームエネルギーに応じて加速高周波電界の周波数変調が可能となる。加速電極M210と回転コンデンサM211は、ヨークM201に形成された加速電極貫通孔M209を介して接続されている。ヨークM201には、抽出ポート貫通孔M208や加速電極貫通孔M209とは別に、必要に応じて貫通孔を形成してもよいことに注意する。例えば、ヨークM201にビーム監視用の貫通孔を設けてもよい。コイルM203は一对の超伝導コイルであり、各超伝導コイルは中心平面M233（図3参照）に関して実質的に面对称に配置され、ヨークM201の内周に沿って設けられている。中心平面M233は上下方向の幾何学的中心断面である。

図2は、主磁石A101の幾何学的中心位置M231とイオン注入位置M232を示しています。ヨークM201とコイルM203がほぼ円周対称の場合、例えば、幾何学的中心位置M231はそれらの中心位置となります。注入位置M232は、幾何学的中心位置M231からシフトした位置であり、ビームが循環する閉軌道の中心に相当します。さらに、図2は、加速器A100から取り出される最低エネルギーのビームが循環するビーム閉軌道M221と、加速器A100から取り出される最高エネルギーのビームが循環するビーム閉軌道M222を示しています。最低エネルギーは、例えば70MeV、最高エネルギーは、例えば230MeVです。RFキッカーM204は、取り出される全てのエネルギーのビームに対してビームを取り出すための抽出用高周波電界を印加する変位ユニットです。これにより、主磁界が印加される主磁界領域を循環するビームが外部へ変位します。主磁界領域とは、ビームが高周波によって所定のエネルギーまで加速される際にビームが通過する領域です。

電場は等エネルギー曲線の集合であり、それぞれのエネルギーに対応する平衡軌道となっている。[0034] ペーラー磁場領域M205とリジェネレータ磁場領域M206は、共鳴磁場領域を構成する。この共鳴磁場領域では、RFキッカーM204によって主磁場領域の外側にずれたビームに共鳴を与える共鳴磁場が形成される。この共鳴磁場領域は、主磁場領域の外周部（具体的には、最もエネルギーの高いビーム閉軌道M222よりも外周側に近い）の所定の方位角領域に配置されている。ペーラー磁場領域M205は、ビーム進行方向に関してリジェネレータ磁場領域M206よりも上流側に配置されている。ペーラー磁場領域M205には、半径方向の外周側に向かって主磁場を弱める方向の磁場勾配を持つペーラー磁場が形成され、リジェネレータ磁場領域M206には、半径方向の外周側に向かって主磁場を強める方向の磁場勾配を持つリジェネレータ磁場が形成される。ペーラー磁場はビームに作用し、ビームを半径方向外側に移動させる。

そして、再生器磁場がビームに作用し、ビームは内側に径方向に移動する。抽出チャンネルM207は、ビームを径方向外側に抽出するための抽出チャンネル磁場を生成する装置である。具体的には、抽出チャンネル磁場は、予め定められたエネルギーに加速されたビームが、主磁場の影響を受けない領域に分離される際に用いられる磁場である。加速されたビームは、ビームが安定して抽出ポートに輸送されるように、適切な双極磁場成分と四極磁場成分を持つように設定される。抽出チャンネル磁場発生装置は、抽出チャンネル磁場を発生させる装置である。抽出チャンネル磁場発生装置は、抽出ビームの進行方向に関して共鳴磁場領域の下流側に配置され、双極磁場成分で抽出ビームの抽出軌道を調整しながら、四極磁場成分で抽出ビームに適切な収束と発散を与え、ビームを安定して抽出する。本実施形態における抽出チャンネルM207は、その径方向の位置が、...より外周側に位置するように配置されている。