



HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, SA, 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, ST, 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：

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

---

electric field matching the orbital frequency corresponding to the nuclear species of the incident ions. The frequency of the high-frequency electric field changes so as to track the energy of the ions. Accordingly, an accelerator and a particle beam therapy system are provided which, despite being compact, are capable of achieving a shortened irradiation time.

(57) 要約：異なる複数種類のイオンを発生させる複数のイオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 と、磁場を発生させる電磁石 1 1 と、高周波電場を発生させる高周波空洞 2 1 と、を備え、イオンの軌道の中心は加速に伴い偏心しており、電磁石 1 1 が発生させる磁場は軌道の動径方向外側に低下する磁場分布であり、高周波空洞 2 1 は、入射するイオンの核種に応じた周回周波数に合わせた高周波電場によって所定エネルギーまでイオンを加速するものであり、高周波電場の周波数はイオンのエネルギーに追従して変化させる。これにより、小型でありながら、照射時間の短縮が可能な加速器および粒子線治療システムが提供される。

## 明 細 書

**発明の名称**： 加速器および粒子線治療システム

### 技術分野

[0001] 本発明は陽子や炭素イオン等の重粒子を加速する加速器、および加速された粒子を腫瘍に照射することで治療する粒子線治療システムに関する。

### 背景技術

[0002] 治療のために人体に荷電粒子ビームを照射する荷電粒子ビームシステムにおいて、システムを小型化しつつ、目標への高い照射集中性や線量分布制御性を実現する荷電粒子ビームシステムの一例として、特許文献1には、重さの異なる複数種類のイオンビームを発生させ、複数種類のイオンをそれぞれの最長水中飛程が異なる最高エネルギーに加速、出射される加速器を用い、ビーム輸送系で回転ガントリーに設置された照射装置から人体に照射する。照射において、照射目標の深さと各イオン種の最大水中飛程を比較し、照射目標の深さが最長水中飛程以下となるイオン種を選択して照射目標に照射することが記載されている。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0003] 特許文献1：特開2015-84886号公報

### 発明の概要

#### 発明が解決しようとする課題

[0004] 粒子線治療で使用する高エネルギー原子核ビームは加速器を用いて生成する。たとえば、炭素原子核を治療用のビームとして用いる場合、核子当たりの運動エネルギーが最大で430MeV前後が必要である。陽子を治療用のビームとして用いる場合は、最大で230MeV前後の運動エネルギーが必要である。

[0005] 特許文献1には、複数核種のビームを一台の加速器で生成し、複数の種類のビームを照射可能なシステムが提案されている。

- [0006] 特許文献 1 に記載の粒子線治療システムでは、加速器としてシンクロトロンが用いられている。シンクロトロンは加速器を構成する電磁石の励磁量を時間的に変化させながら内部を周回する粒子の運動エネルギーを増大させている。
- [0007] しかし、シンクロトロンはビームを偏向する偏向電磁石以外にも、四極発散電磁石や共鳴励起用多極電磁石、ベータトロン振動を増加して共鳴の安定限界を越えさせるためのビームの出射用の高周波印加装置、出射用の静電偏向器及び出射用偏向電磁石等の様々な機器が必要であり、小型化には限界があった。また、様々な機器が必要であることから、低コスト化にも限界があった。
- [0008] シンクロトロン以外の加速器として、サイクロトロンが存在する。しかし、サイクロトロンは、主磁場中を周回するビームを高周波電場で加速する種類の加速器である。軌道上の平均磁場をビームの相対論的 $\gamma$ ファクターに比例させることで、周回の時間をエネルギーに依らず一定としている。この性質を持つ主磁場分布を等時性磁場と呼んでいる。
- [0009] ここで、等時性磁場下では軌道に沿って磁場を変調させることで軌道面内と軌道面に垂直な方向のビーム安定性を確保している。上述の等時性とビームの安定性を両立するために、主磁場分布には極大部と極小部が必要である。この分布のついた非一様な磁場は、主電磁石の対向する磁極間の距離を極大部では狭く、極小部では広くとることで形成することができる。しかしながら、極大部の磁場と極小部の磁場との差は強磁性体である磁極材料の飽和磁束密度程度が実用上限界である。すなわち、極大部の磁場と極小部の磁場との差は 2 T 程度に制限される。
- [0010] 一方、加速器を小型化する場合、主磁場を高めて、ビーム軌道の偏向半径を小さくすることが必要であるが、主磁場と前述の極大部の磁場と極小部の磁場との差は比例関係にあり、前述の限界が加速器の現実的な大きさを決める要因となっている。よってサイクロトロンは小型化が困難であった。
- [0011] また、サイクロトロンではディグレータを用いることなく取り出しビーム

のエネルギーを変更することが困難であった。また、ディグレータを用いる場合、ビーム電流が減少してしまうことから、照射時間の短時間化が困難であった。

[0012] 本発明は、小型でありながら、照射時間の短縮が可能な加速器および粒子線治療システムを提供する。

### 課題を解決するための手段

[0013] 本発明は、上記課題を解決する手段を複数含んでいるが、その一例を挙げるならば、加速器であって、異なる複数種類のイオンを発生させる複数のイオン源と、磁場を発生させる主磁石と、高周波電場を発生させる高周波空洞と、を備え、前記イオンの軌道の中心は加速に伴い偏心しており、前記主磁石が発生させる磁場は前記軌道の動径方向外側に低下する磁場分布であり、前記高周波空洞は、入射するイオンの核種に応じた周回周波数に合わせた高周波電場によって所定エネルギーまで前記イオンを加速するものであり、前記高周波電場の周波数はイオンのエネルギーに追従して変化させることを特徴とする。

### 発明の効果

[0014] 本発明によれば、加速器の小型化が可能であり、かつ照射時間の短縮の両立が可能となる。

### 図面の簡単な説明

[0015] [図1]本発明の実施例1の加速器の全体概形である。

[図2]実施例1の加速器の構造を示す図である。

[図3]実施例1の加速器におけるビームの運動エネルギーと周回周波数の関係を示す図である。

[図4]実施例1の加速器におけるビームの運動エネルギーと磁気剛性率の関係を示す図である。

[図5]実施例1の加速器における設計軌道の形状を示す図である。

[図6]実施例1の加速器におけるビームの磁気剛性率と設計軌道上の磁場の関係を示す図である。

[図7]実施例1の加速器における制御ダイアグラムを示す図である。

[図8]実施例1の加速器における運転時のタイミングチャートの一例を示す図である。

[図9]実施例1の加速器における運転時のタイミングチャートの一例を示す図である。

[図10]実施例2の粒子線治療装置の全体概形を示す図である。

### 発明を実施するための形態

[0016] 以下に本発明の加速器および粒子線治療システムの実施例を、図面を用いて説明する。

[0017] <実施例1>

本発明の好適な一実施例である実施例1の加速器を図1乃至図9を用いて以下に説明する。

[0018] 本実施例の加速器1は周波数変調型の可変エネルギーおよび可変核種の加速器である。この加速器1は時間的に一定な磁場を主磁場として持ち、主磁場中を周回する陽子、ヘリウム、炭素等の異なる複数種類のイオンを高周波電場によって加速するタイプの加速器である。その外観を図1に示す。

[0019] 図1に示すように、加速器1は、上下に分割可能な電磁石11によって、加速・周回中のビームが通過する領域（以下、ビーム通過領域20と呼ぶ、図2参照）内に主磁場が励起される。電磁石11には外部とビーム通過領域20とを接続する貫通口が複数穿たれている。

[0020] 貫通口として、加速されたビームを取り出す取り出しビーム用貫通口111、コイル導体を外部に引き出すための貫通口112、113、高周波電力入力用貫通口114が上下磁極の接続面上に設けられている。本実施例の加速器1では、高周波電力入力用貫通口114を通じて高周波空洞21が設置されている。

[0021] 高周波空洞21には後述するように、加速用のディー電極211（図2参照）と回転式可変容量キャパシタ212が設置されている。

[0022] 電磁石11の上部には、異なる複数種類のイオンを発生させる複数のイオ

ン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 が中心からずれた位置に設置されており、ビーム入射用貫通口 1 1 5 を通して所定の核種のイオンビームが加速器 1 内部に入射される。

[0023] イオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 は電磁石 1 1 の外部に配置される外部イオン源であり、それぞれ陽子・ヘリウムイオン・炭素イオンを生成するイオン源である。

[0024] イオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 から加速器 1 の入射領域 1 3 0 (図 2 参照) までのビーム輸送経路上となるビーム入射用貫通口 1 1 5 には、イオン核種切り替えのための振り分け電磁石 2 2 4 が設置されている。本実施例の加速器 1 では、所定の核種がビーム輸送経路上を輸送されるように振り分け電磁石 2 2 4 の励磁量が調整される。すなわち、振り分け電磁石 2 2 4 の励磁量によって加速器 1 へ入射できるイオン種を定めることができる。

[0025] ビーム通過領域 2 0 は真空引きされている。

[0026] 次に、加速器の内部構造について図 2 を用いて説明する。図 2 は電磁石 1 1 を上下に分割し、それを上方から見た図である。

[0027] 図 2 に示すように、電磁石 1 1 の上下部それぞれは、リターンヨーク 1 2 1、天板 1 2 2、円柱状の磁極 1 2 3 を有し、上下対向した磁極 1 2 3 によって挟まれる円筒状の空間内に、ビーム通過領域 2 0 がある。この上下の磁極 1 2 3 が互いに対向している面を磁極面と定義する。また磁極面に挟まれた磁極面に平行かつ上下の磁極面から互いに等距離にある面を軌道面と呼ぶ。

[0028] 磁極 1 2 3 とリターンヨーク 1 2 1 の間に形成される凹部に円環状の主コイル 1 3 が磁極 1 2 3 の壁に沿って設置されている。主コイル 1 3 に電流を流すことによって磁極 1 2 3 が磁化し、ビーム通過領域 2 0 に後述する所定の分布での磁場が励起される。

[0029] 磁極 1 2 3 には磁場の微調整用のトリムコイル 3 0 が複数系統設けられており、これは貫通口 1 1 3 を通じて外部の電源に接続されている。各系統個別に励磁電流を調整することで、後述の主磁場分布に近づけ、安定なベータ

- トロン振動を実現するように運転前にトリムコイル電流が調整されている。
- [0030] 高周波空洞 2 1 は  $\lambda/4$  型の共振モードによって加速ギャップ 2 1 3 に高周波電場を励起させる。高周波空洞 2 1 の内、特に加速器に対して固定的に設置された部分をディー電極 2 1 1 と定義する。
- [0031] ビームはディー電極 2 1 1 と、このディー電極 2 1 1 に対向するように設置された接地電極 2 1 4 とによって挟まれた領域に形成される加速ギャップ 2 1 3 に励起される高周波電場によって加速される。高周波電場の位相を前述のビームの周回に同期させるために、高周波電場の周波数はビームの周回周波数の整数倍であることが必要である。この加速器 1 では高周波電場の周波数はビームの周回周波数の 1 倍としている。
- [0032] ビームは入射領域 1 3 0 から低エネルギーのイオンの状態で加速器 1 に入射される。イオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 で生成されたイオンは引き出し電極 (図示省略) に印加された電圧によって入射経路に引き出され、貫通口 1 1 5 を通じて入射領域 1 3 0 に入射される。
- [0033] 入射領域 1 3 0 には静電ディフレクタ (図示省略) が設置されており、イオンの偏向に必要な電力が電磁石 1 1 の外部から供給されている。入射されたビームは高周波空洞 2 1 によって励起される高周波電場によって加速ギャップ 2 1 3 を通過する毎に加速される。
- [0034] 所定エネルギーのイオンビームを加速器 1 外に取り出す為に励磁するキッカ磁場発生コイルとして、第 2 コイル 3 1 1 および第 1 コイル 3 1 2 が磁極面の一部に電氣的に絶縁された状態でイオンの軌道上に設置されている。本実施例では、第 2 コイル 3 1 1 および第 1 コイル 3 1 2 に電流を流すことにより、主磁場に対して後述する磁場が重畳励磁される。第 2 コイル 3 1 1 および第 1 コイル 3 1 2 の詳細については後述する。
- [0035] また、磁極面の端部の一か所には、取り出し用セプタム電磁石 3 2 の入射部が設置されている。キッカ磁場の存在下で周回中のビームはその位置を設計軌道からずらされ、取り出し用セプタム電磁石 3 2 の入射部までビームが移動し、その後、取り出し用セプタム電磁石 3 2 の磁場によって形成される

取り出し軌道 3 2 2 に沿ってビームは加速器 1 の外に取り出される。

[0036] 本実施例の加速器 1 では、軌道面において主磁場は面内成分がほぼ 0 となるように、磁極 1 2 3、主コイル 1 3、トリムコイル 3 0、キッカ磁場発生コイル、取り出し用セプタム電磁石 3 2 の形状と配置は軌道面に対して面対称としている。また、磁極 1 2 3、ディー電極 2 1 1、主コイル 1 3、トリムコイル 3 0、キッカ磁場発生コイルの形状は、図 2 に示すように、加速器 1 を上部側から見たときに左右対称の形状となっている。

[0037] 次に、本実施例の加速器 1 中を周回するビームの軌道について述べる。本実施例の加速器 1 によって加速可能な粒子は陽子、ヘリウム原子核および炭素原子核である。

[0038] 各イオンビームはそれぞれ別個に設けられたイオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 において生成され、共通の入射経路であるビーム入射用貫通口 1 1 5 を通じて、入射領域 1 3 0 まで輸送される。

[0039] 入射領域 1 3 0 に入射されたビームは静電ディフレクタによって軌道面に平行な方向に偏向され、主磁場から受けるローレンツ力によって周回運動を始める。ビームは後述する設計軌道に沿って周回運動する。

[0040] ビームは加速器 1 内を 1 回周回する度に加速ギャップ 2 1 3 を 2 回通過し、通過の度に高周波電場からの力によってビームは加速される。運動エネルギーが大きくなるにつれ、ビームの周回周波数は小さくなる。主磁場はビームの軌道に沿って一様、かつ、エネルギーが高くなるにつれ磁場が低下していくような分布を作る。つまり、径方向外側の磁場が低下するような磁場を形成する。

[0041] このような磁場下においては、ビームの軌道面内の動径方向と軌道面に対して垂直な方向のそれぞれに対して安定にベータトロン振動する。この原理により、ビームはビーム通過領域 2 0 中を周回しながら加速される。

[0042] 入射領域での主磁場の大きさは 5 T であり、イオン種が陽子の場合、入射直後の運動エネルギーのイオンでは周回周波数が 7 6. 2 3 MHz, 最大エネルギー 2 3 5 MeV に達したビームは 6 0. 6 7 MHz で周回する。ヘリ

ウムの場合は入射直後に38.38MHz、最大エネルギー235MeV/uで30.44MHzである。炭素の場合、入射直後に38.40MHz、最大エネルギー430MeV/uで26.10MHzである。

[0043] これらのエネルギーと周回周波数の関係は図3のようになる。図3には太線で陽子、細線でヘリウム、点線で炭素の周波数依存性を示している。ヘリウムと炭素の質量電荷比がほぼ等しいことから、図3では両者のグラフは実質上重なって見える。また、実用上も同じと見做すことができる。

[0044] 取り出し可能なビームの運動エネルギーはイオン種が陽子の場合、最小70MeVから最大235MeVである。ヘリウムの場合は最小70MeV/uから最大235MeV/uである。炭素の場合、最小140MeV/uから最大430MeV/uである。

[0045] これらの異なるイオン種のビームの軌道とベータトロン振動の特性は、磁気剛性率によって統一的に定めることが可能である。磁気剛性率 ( $B\rho$  値) とイオンごとの運動エネルギーの関係を図4に示す。

[0046] 図4によると、陽子の最大磁気剛性率は2.35Tm、ヘリウムでは4.67Tm、炭素では6.64Tmである。すなわち、炭素の最大磁気剛性率に対応する6.64Tmまでの磁気剛性率のビームに対して軌道が定義され、ベータトロン振動が安定である必要がある。

[0047] 各磁気剛性率ビームの軌道の形状を図5に示す。図5に示すように、最も外側に最大磁気剛性率6.9Tmの軌道に対応した半径1.39mの円軌道が存在し、そこから、0Tmまで磁気剛性率で53分割した都合52本の円軌道を図示している。点線あるいは破線は各軌道の同一の周回位相を結んだ線であり、等周回位相線と呼ぶ。等周回位相線は集約領域から周回位相 $\pi/20$ ごとにプロットしている。等周回位相線のうち破線で示したものは加速ギャップの中心位置である。

[0048] この加速器1では、ビームの加速に従ってビームの軌道中心が軌道面内で一方向に移動する。軌道中心が移動する結果、異なる運動エネルギーの軌道が互いに近接している箇所と互いに遠隔している領域が存在する。すなわち

、ビームの周回軌道が偏心している。

[0049] 最も軌道同士が近接している軌道の各点を結ぶと軌道に直交する線分となり、また、最も軌道同士が遠隔している軌道の各点を結ぶと軌道に直交する線分となる。この二つの線分は同一直線上に存在する。この直線を対称軸と定義すると、軌道の形状と主磁場の分布は対称軸を通り、軌道面に垂直な面に対して面对称となる。

[0050] 前述の近接した軌道の各点において、偏向角  $\theta = 0$  度となるように座標  $\theta$  を導入する。 $\theta$  は近接点から見た偏向角である。いずれの軌道においてもデー電極 2 1 1 と対向する接地電極 2 1 4 の間に形成される加速ギャップ 2 1 3 は集約点から見て  $\pm 90$  度周回した等周回位相線に沿って設置される。

[0051] 上記のような軌道構成と軌道周辺での安定な振動を生じさせるために、本実施例の加速器 1 においては、設計軌道は、偏向半径方向外側に行くにつれ磁場の値が小さくなる主磁場分布とする。また、設計軌道に沿って磁場は一定である。よって、設計軌道は円形となり、ビームエネルギーが高まるにつれその軌道半径・周回時間は増大する。

[0052] このような体系では、設計軌道から半径方向に微小にずれた粒子は設計軌道に戻すような復元力を受ける。同時に、軌道面に対して鉛直な方向にずれた粒子も軌道面に戻す方向に主磁場から復元力を受ける。すなわち、ビームのエネルギーに対して適切に磁場を小さくしていけば、常に設計軌道からずれた粒子は設計軌道に戻そうとする向きに復元力が働き、設計軌道の近傍を振動することになる。これにより、安定にビームを周回・加速させることが可能である。この設計軌道を中心とする振動をベータatron振動と呼ぶ。

[0053] 各磁気剛性率のビームにおける磁場の値を図 6 に示した。図 6 に示すように、磁場は入射点で最大の 5 T となり、最外周では 4.966 T まで低下する。

[0054] 上述の主磁場分布は主コイル 1 3 とトリムコイル 3 0 に所定の励磁電流を流すことによって磁極 1 2 3 が磁化されることで励起される。イオンの入射点で磁場を大きくし、外周に向かって磁場を小さくする分布を形成するため

に、磁極 1 2 3 が対向する距離（ギャップ）は入射点において最も小さく、外周に向かって大きくなる形状となる。

[0055] さらに、磁極形状はギャップ中心を通る平面（軌道面）に対して面对称の形状であり、軌道面上においては軌道面に垂直な方向の磁場成分のみを持つ。さらに、磁場分布の微調整を磁極面に設置されたトリムコイル 3 0 に印加する電流を調整することで行い、所定の磁場分布を励起している。

[0056] 高周波空洞 2 1 は  $\lambda/4$  型の共振モードによって加速ギャップ 2 1 3 に高周波電場を励起させる。本実施例の加速器 1 においてはビームの周回に同期して高周波電場を励起するために、高周波電場の周波数は周回中のビームのエネルギーに追従して変調させる。

[0057] 本実施例に用いられるような共振モードを用いた高周波空洞 2 1 では共振の幅よりも広い範囲で高周波の周波数を掃引する必要がある。そのために高周波空洞 2 1 の共振周波数も変更する必要がある。

[0058] その制御は高周波空洞 2 1 の端部に設置された回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 の静電容量を変化させることで行う。回転式可変容量キャパシタ 2 1 2 は回転軸 2 1 5 に直接接続された導体板と外部導体との間に生じる静電容量を回転軸 2 1 5 の回転角によって制御する。すなわち、ビームの加速に伴い回転軸 2 1 5 の回転角を変化させる。

[0059] 本実施例の加速器 1 におけるビーム入射から取り出しまでのビームの挙動について以下説明する。

[0060] まず、運転者によって所望のイオン核種と運動エネルギーを全体制御装置 4 0 に入力する。指定された核種のイオン源からイオンビームが出力され、ビーム通過領域 2 0 にビームが導かれるように、全体制御装置 4 0 によってイオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 を動作させるとともに振り分け電磁石 2 2 4 の励磁量が設定される。

[0061] 前述の通り、核種によって入射時の周回周波数が異なるため、入射に適した回転軸 2 1 5 の角度が異なる。そのため、回転角センサ 2 1 6（図 7 参照）からの信号に基づき、高周波空洞 2 1 の共振周波数が入射時の周回周波数

に一致したタイミングでイオン源 221, 222, 223 からイオンが出力される。

[0062] ビーム通過領域 20 に入射されたビームは高周波電場による加速を受けながら、そのエネルギーが増大するとともに、軌道の回転半径を増加させていく。

[0063] その後ビームは高周波電場による進行方向安定性を確保しながら加速される。すなわち、時間的に高周波電場が減少している時に加速ギャップ 213 を通過させる。すると、高周波電場の周波数とビームの周回周波数はちょうど整数倍（本実施例では 1 倍）の比で同期させているため、所定の加速電場の位相で加速された粒子は次のターンも同じ位相で加速を受ける。一方、加速位相より早い位相で加速された粒子は加速位相で加速された粒子よりもその加速量が大きいため、次のターンでは遅れた位相で加速を受ける。また逆に有る時に加速位相より遅い位相で加速された粒子は加速位相で加速された粒子よりもその加速量が小さいため、次のターンでは進んだ位相で加速を受ける。

[0064] このように、所定の加速位相からずれたタイミングの粒子は加速位相に戻る方向に動き、この作用によって、運動量と位相からなる位相平面（進行方向）内においても安定に振動することができる。この振動をシンクロトロン振動と呼ぶ。すなわち、加速中の粒子はシンクロトロン振動をしながら、徐々に加速され、取り出される所定のエネルギーまで達する。

[0065] 所定のエネルギーで取り出すために、目標エネルギーを基に定められた所定の励磁電流がキッカ磁場発生コイルに流される。目標エネルギーまで加速されたビームは、キッカ磁場発生コイルに電流が流されていない場合はその設計軌道に沿って周回するが、キッカ磁場発生コイルに電流が流されている場合はキッカ磁場発生コイル由来の磁場によってビームはキックを受け設計軌道から変位する。

[0066] キッカ磁場発生コイルは軌道面から垂直な方向にずれた位置に軌道面に対して対称に設置されている。さらに、ビーム軌道の最も密に集約した点と疎

に離散した点を結ぶ直線（対称軸）に対して左右対称の形状である。

[0067] キッカ磁場発生コイルを構成する第1コイル312と第2コイル311は、それぞれ別個のキッカ磁場発生用コイル電源44A、44B（図7参照）に接続されており、互いに逆向きの磁場を生じさせるように電流の向きが制御されている。

[0068] 第1コイル312には主磁場に対して同じ向きの磁場を生じるように電流が流され、第2コイル311には主磁場に対して逆向きの磁場を生じるように電流が流されている。第1コイル312のことを一般にリジェネレータと呼び、第2コイル311のことを一般にピーラとも呼ぶ。

[0069] このように、周回中のある位置でビーム動径方向内側のキックをリジェネレータが与え、さらに下流で動径方向外側のキックをピーラが与えるようにすると、チューンが1に近い本実施例の加速器1ではピーラとリジェネレータの間における動径方向変位が増加する。

[0070] ビームは複数ターンに渡って、ピーラとリジェネレータからのキックを受けるため、ビームは集約点の位置における動径方向辺が増大し続ける。ある程度、動径方向変位が増大すると、集約点の外側に設置された取り出し用セプトム電磁石32に入射され、加速器1外に取り出される。

[0071] 上述のような原理によってビームを加速し、加速器1外に取り出すときの各機器の制御ダイアグラムと運転フローについて以下図7、図8、図9を参照して説明する。図7に本実施例の加速器1の制御ダイアグラムを示す。

[0072] ビームを加速するための構成とその制御系としては、図7に示すような、高周波空洞21に付随する回転式可変容量キャパシタ212と、回転式可変容量キャパシタ212の回転軸215に接続されるモータ217、モータ217を制御するモータ制御装置41がある。また、高周波空洞21に高周波電力を入力するための入力カップラ218と、供給する高周波電力を生成する低レベル高周波発生装置42およびアンプ43がある。

[0073] 回転式可変容量キャパシタ212では、治療計画データベース60によって定められ、全体制御装置40より指示されたモータ制御装置41に制御さ

れることによって、予め定められた回転速度でモータ 217 が回転することで回転軸 215 が回転し、回転軸 215 の回転角が時間的に変化することで容量を時間的に変調させる。

[0074] 低レベル高周波発生装置 42 によって発生させた高周波信号をアンプ 43 によって増幅することで高周波空洞 21 に入力される高周波電力を作る。低レベル高周波発生装置 42 において作る高周波信号の周波数と振幅は、治療計画データベース 60 によって定められており、全体制御装置 40 より指示される。

[0075] ビームを加速器 1 外に取り出すための構成とその制御系として、図 7 に示すような、第 1 コイル 312 に電流を供給するキッカ磁場発生用コイル電源 44 A および第 2 コイル 311 に電流を供給するキッカ磁場発生用コイル電源 44 B と、このキッカ磁場発生用コイル電源 44 A, 44 B を制御するキッカ磁場発生用コイル電源制御装置 45 がある。

[0076] キッカ磁場発生用コイル電源 44 A, 44 B から第 1 コイル 312 および第 2 コイル 311 に出力される電流値はキッカ磁場発生用コイル電源制御装置 45 によって制御されており、その指定値は取り出しビームの磁気剛性率から一意に定まる値として治療計画データベース 60 によって定められ、全体制御装置 40 より指示される。

[0077] 以上のような加速器 1 の制御系における、ある磁気剛性率のビームを取り出す際の各機器の動作（運転方法）について図 8 および図 9 を用いて説明する。図 7 は各機器の動作のタイミングチャートである。

[0078] 図 8 にはある磁気剛性率の陽子ビームを取り出す際の各機器の動作のタイミングチャートを示し、図 9 には炭素ビームを取り出す際の各機器の動作のタイミングチャートを示す。

[0079] 図 8 および図 9 では、可変容量キャパシタ 212 の回転軸の回転角、高周波空洞 21 の共振周波数、イオン源 221, 222, 223 が出力するビーム電流波形、キッカ磁場発生コイルに流れる電流のタイムチャートとともに、加速器 1 から出力されるビーム電流波形を示している。図 8, 図 9 の横軸

はすべて時間である。

[0080] まず、前述の如く可変容量キャパシタ 2 1 2 の回転軸の回転角によって高周波空洞 2 1 の共振周波数が周期的に変化する。それに合わせて低レベル高周波発生装置 4 2 から出力される高周波信号の周波数を同期して変化させる。共振周波数が最大となる時刻から次に最大となる時刻までの期間を運転周期と定義する。

[0081] 核種が陽子の場合、図 8 に示すように、運転周期の開始直後からイオン源からのビーム出力が始まる。

[0082] 一方、炭素の場合は、図 9 に示すように、共振周波数が 3 8 . 3 8 M H z に低下するタイミングでイオン源からのビーム出力が始まる。

[0083] 加速を受ける際に、安定なシンクロトロン振動が可能な範囲に入射されたビームは継続して加速を受けるが、シンクロトロン振動が安定しないビームは加速されずに加速器 1 内部の構造物に衝突して失われる。

[0084] 共振周波数が低下するにつれてビームは加速されていき、所定の取り出しエネルギー近くまで加速される。所定のエネルギー近くまで加速されたビームは第 1 コイル 3 1 2 および第 2 コイル 3 1 1 からの磁場によるキックを受け、集約点での変位が動径方向外側にずれ始める。さらに加速を受け所定のエネルギーまで到達すると、取り出し用セプタム電磁石 3 2 にビームは入り、その後取り出される。

[0085] 次に、本実施例の効果について説明する。

[0086] 上述した本発明の実施例 1 の加速器 1 は、異なる複数種類のイオンを発生させる複数のイオン源 2 2 1 , 2 2 2 , 2 2 3 と、磁場を発生させる電磁石 1 1 と、高周波電場を発生させる高周波空洞 2 1 と、を備え、イオンの軌道の中心は加速に伴い偏心しており、電磁石 1 1 が発生させる磁場は軌道の動径方向外側に低下する磁場分布であり、高周波空洞 2 1 は、入射するイオンの核種に応じた周回周波数に合わせた高周波電場によって所定エネルギーまでイオンを加速するものであり、高周波電場の周波数はイオンのエネルギーに追従して変化させる。

- [0087] この原理の加速器 1 は、従来のシンクロトロンと比較して、主磁場を静磁場とすることができ、高磁場化が容易であることからコンパクトな加速器となる。
- [0088] また、特許文献 1 に記載の従来のシンクロトロンでは、入射器として線形加速器を用い、線形加速器から低エネルギービーム輸送系を通じてシンクロトロンに入射するスキームでビームを加速している。そのため、核種が変わる際に、イオン源の種類と線形加速器の加速電場、ビーム輸送系の電磁石励磁量、シンクロトロンの磁場と周波数およびその関係などを変更する必要があり、核種の切り替えに数秒かかると考えられる。
- [0089] 一方で、本実施例の加速器 1 に依れば、核種の切り替えでは、例えば、前述のイオン入射経路の電磁石と取り出されるビームの磁気剛性率が必然的に変更されることによるキッカ磁場発生コイルの励磁量およびイオンの入射タイミングのみ変更される。すなわち、電磁石励磁量と動作のタイミングの変更のみで核種が変更できるため、エネルギー変更の為に必要な数百 m s 程度の時間で核種の変更も可能である。
- [0090] 以上の特性により、高磁場の適用によるコンパクト化と、静磁場の適用による運転周期短縮と、核種変更時間の短縮によって、コンパクトかつ平均ビーム量の大きい加速器 1 が提供できる。
- [0091] また、イオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 は、電磁石 1 1 の外部に配置されるため、ビーム通過領域 2 0 にイオン源を複数配置する必要がなく、電磁石 1 1、延いては加速器 1 をより確実に小型化することができる。
- [0092] 更に、イオンの軌道の上に、所定エネルギーのイオンを取り出すための磁場を発生させる第 1 コイル 3 1 2, 第 2 コイル 3 1 1 を更に備えたことで、取り出したい特定エネルギーとなったビームに対して周回軌道面内のベータatron 振動を不安定化させることができるため、任意エネルギーのビームを取り出すことができる。従って、散乱体を用いることなくエネルギー可変ビームを取り出せるので、取り出し時に失われるビーム電流値を最小限に留めることができ、高い照射線量率を実現することができる。また、電氣的にビー

ムの取り出しエネルギーを変更できるため、散乱体を機械的に移動する方式よりもエネルギー切替えに要する時間が短い、という利点も有する。

[0093] また、イオン源 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 と電磁石 1 1 との間のビーム入射用貫通口 1 1 5 上に配置された振り分け電磁石 2 2 4 を更に備えたことにより、簡易な構成で高精度にイオンの切り替えが可能となる。

[0094] なお、本実施例では、複数種類の核種のイオン種の切り替えを振り分け電磁石 2 2 4 によって行う場合について説明したが、切り替えは電磁石を用いる磁場に限らず、電極を用いる電場によっても切り替えを行うことができる。

[0095] <実施例 2>

本発明の好適な一実施例である実施例 2 の粒子線治療システムについて図 1 0 を用いて説明する。実施例 1 と同じ構成には同一の符号を示し、説明は省略する。

[0096] 実施例 2 は、実施例 1 に挙げた加速器 1 が用いられた粒子線治療システムである。システムの全体構成図を図 1 0 に示す。

[0097] 図 1 0 に示すように、粒子線治療システム 1 0 0 0 は、患部の体表からの深さによって照射する陽子線、ヘリウム線あるいは炭素線（以下ではまとめてビームと呼ぶ）のエネルギーを適切な値にして患者に照射する装置である。

[0098] 粒子線治療システム 1 0 0 0 は、イオンを加速する加速器 1 と、加速器 1 で加速されたビームを後述する照射装置に対して輸送するビーム輸送系 2 と、ビーム輸送系 2 によって輸送されたビームを治療台 4 に固定された患者 5 内の標的に照射する照射装置 3 と、加速器 1、ビーム輸送系 2 および照射装置 3 を制御する全体制御装置 4 0 および照射制御装置 5 0 と、標的に対するビームの照射計画を作成する治療計画装置 7 0 と、この治療計画装置 7 0 によって作成された治療計画が記憶された治療計画データベース 6 0 と、を備えている。

[0099] 粒子線治療システム 1 0 0 0 では、照射する粒子線のエネルギーと線量が

治療計画装置 70 によって作成され、治療計画データベース 60 に記憶された治療計画によって定められる。治療計画が定めた、粒子線のエネルギーと照射量を全体制御装置 40 から照射制御装置 50 に順次入力し、適切な照射量を照射した時点で次のエネルギーあるいは次の核種に移行して再度粒子線を照射する手順によって実現される。

[0100] 本発明の実施例 2 の粒子線治療システムによれば、前述した実施例 1 の加速器 1 の特性である、コンパクト性と平均ビーム量の大きさを活かしてコンパクトかつスループットの高いシステムを実現できる。

[0101] なお、粒子線治療システム 1000 のビーム輸送系 2 は、図 10 に示すような固定されたものに限られず、回転ガントリと呼ばれる照射装置 3 ごと患者 5 の周りを回転可能とした輸送系とすることができる。また、照射装置 3 は一つに限られず、複数設けることができる。更には、ビーム輸送系 2 を設けずに、加速器 1 から照射装置 3 に対してビームを直接輸送する形態とすることができる。

[0102] <その他>

なお、本発明は、上記の実施例に限定されるものではなく、様々な変形例が含まれる。上記の実施例は本発明を分かりやすく説明するために詳細に説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。

[0103] 例えば、加速器 1 で加速する複数種類のイオンとして陽子、ヘリウム、炭素の 3 つの場合について説明したが、加速されるイオンはこの 3 種類に限られず、様々な種類のイオンを加速することができる。また、3 種類である必要もなく、2 つ以上とすることができる。

## 符号の説明

[0104] 1 … 加速器

1 1 … 電磁石

1 1 1 … 取り出しビーム用貫通口

1 1 2, 1 1 3 … コイル接続用貫通口

- 1 1 4 …高周波電力入力用貫通口
- 1 1 5 …ビーム入射用貫通口
- 1 3 …主コイル
- 1 2 1 …リターンヨーク
- 1 2 2 …天板
- 1 2 3 …磁極
- 1 3 0 …入射領域
- 2 0 …ビーム通過領域
- 2 1 …高周波空洞
- 2 1 1 …ディー電極
- 2 1 2 …回転式可変容量キャパシタ
- 2 1 3 …加速ギャップ
- 2 1 4 …接地電極
- 2 1 5 …回転軸
- 2 1 6 …回転角センサ
- 2 1 7 …モータ
- 2 1 8 …入力カプラ
- 2 2 1, 2 2 2, 2 2 3 …イオン源
- 2 2 4 …振り分け電磁石
- 3 0 …トリムコイル
- 3 1 1 …第2コイル (キッカ磁場発生コイル)
- 3 1 2 …第1コイル (キッカ磁場発生コイル)
- 3 2 …取り出し用セプタム電磁石
- 3 2 1 …取り出し軌道
- 4 0 …全体制御装置
- 4 1 …モータ制御装置
- 4 2 …低レベル高周波発生装置
- 4 3 …アンプ

4 4 A, 4 4 B…キッカ磁場発生用コイル電源

4 5…キッカ磁場発生用コイル電源制御装置

5 0…照射制御装置

6 0…治療計画データベース

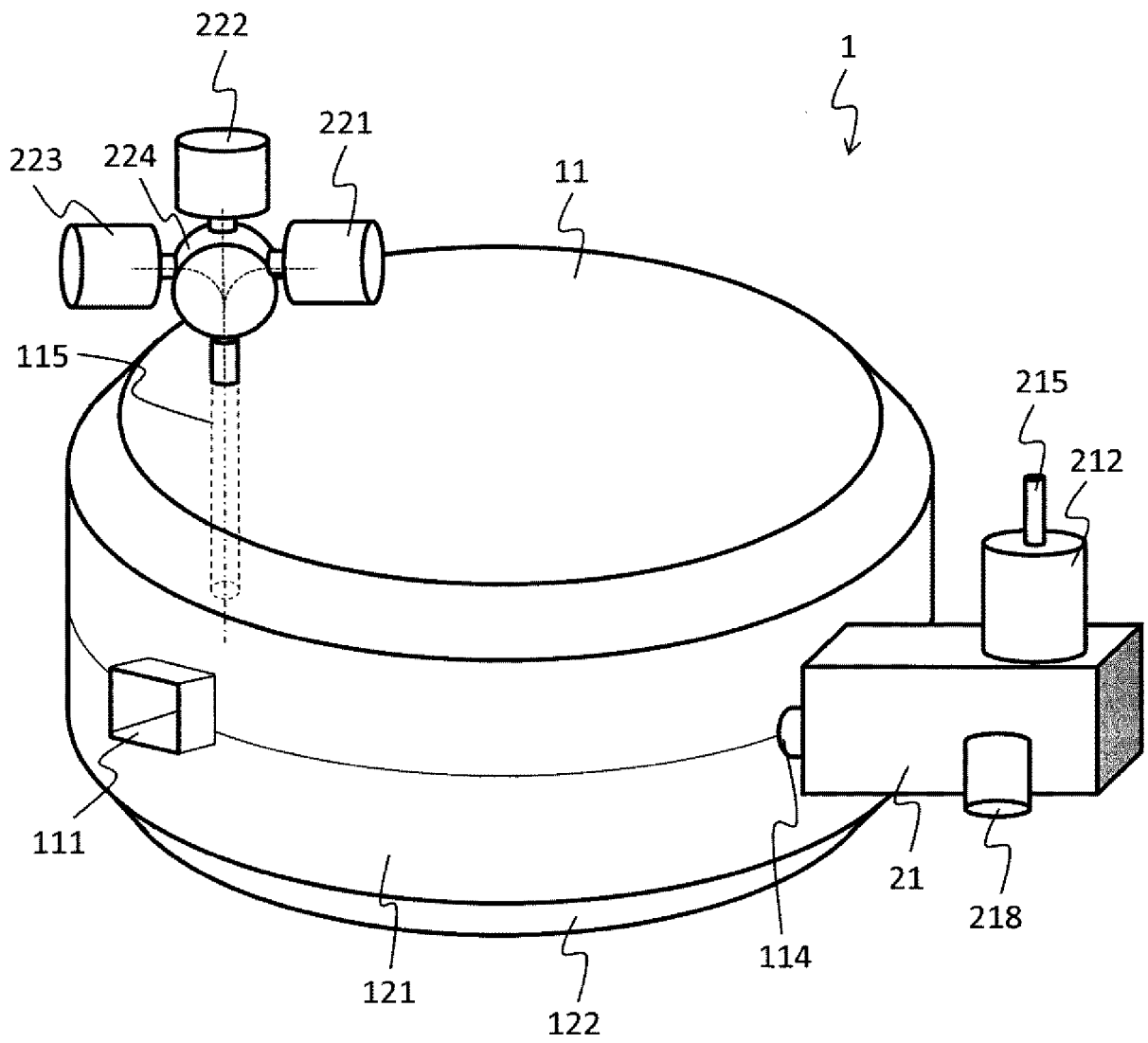
7 0…治療計画装置

1 0 0 0…粒子線治療システム

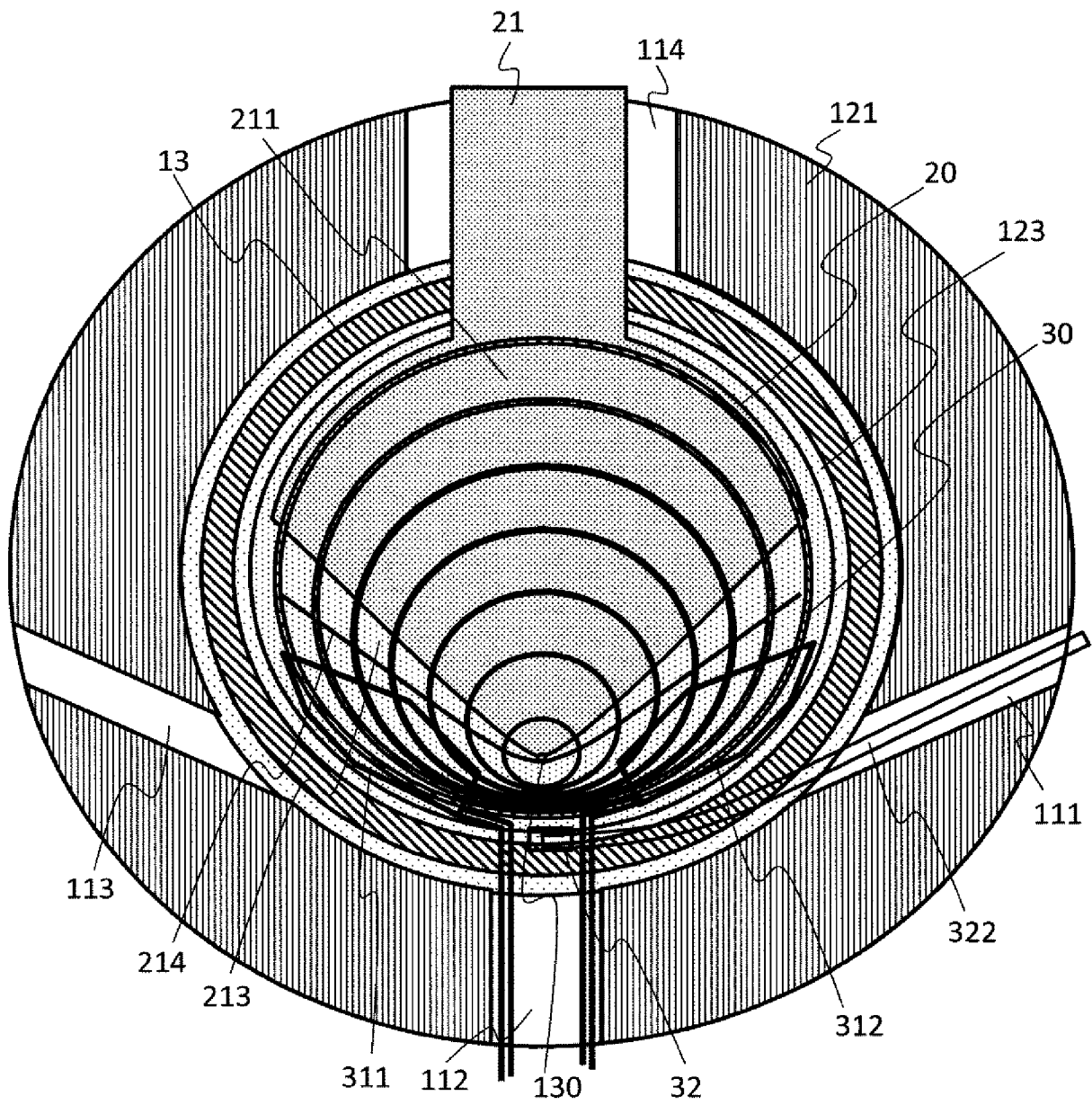
## 請求の範囲

- [請求項1] 加速器であって、  
異なる複数種類のイオンを発生させる複数のイオン源と、  
磁場を発生させる主磁石と、  
高周波電場を発生させる高周波空洞と、を備え、  
前記イオンの軌道の中心は加速に伴い偏心しており、  
前記主磁石が発生させる磁場は前記軌道の動径方向外側に低下する  
磁場分布であり、  
前記高周波空洞は、入射するイオンの核種に応じた周回周波数に合  
わせた高周波電場によって所定エネルギーまで前記イオンを加速する  
ものであり、前記高周波電場の周波数はイオンのエネルギーに追従し  
て変化させる  
ことを特徴とする加速器。
- [請求項2] 請求項1に記載の加速器において、  
前記イオン源は、前記主磁石の外部に配置される  
ことを特徴とする加速器。
- [請求項3] 請求項1に記載の加速器において、  
前記イオンの軌道上に、所定エネルギーのイオンを取り出すための  
磁場を発生させるコイルを更に備えた  
ことを特徴とする加速器。
- [請求項4] 請求項1に記載の加速器において、  
前記イオン源と前記主磁石との間のビーム輸送経路に配置された振  
り分け電磁石を更に備えた  
ことを特徴とする加速器。
- [請求項5] 加速器をビーム源として用いる粒子線治療システムであって、  
請求項1に記載の加速器を、前記ビーム源として用いた  
ことを特徴とする粒子線治療システム。

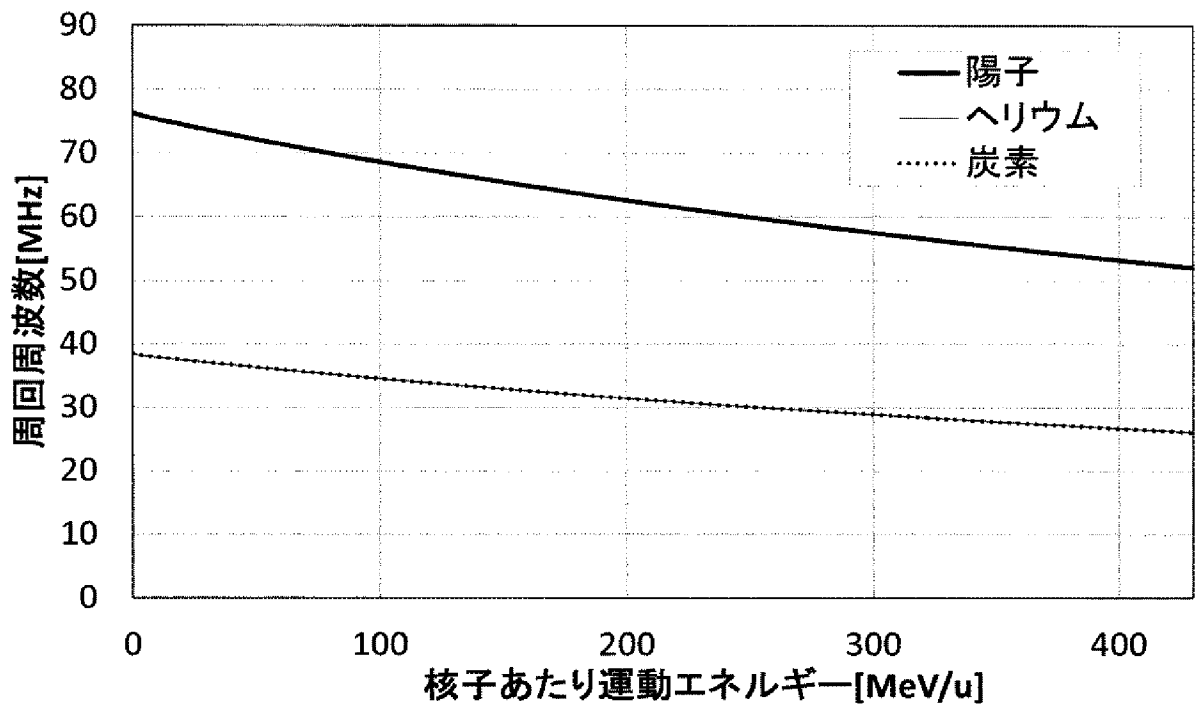
[図1]



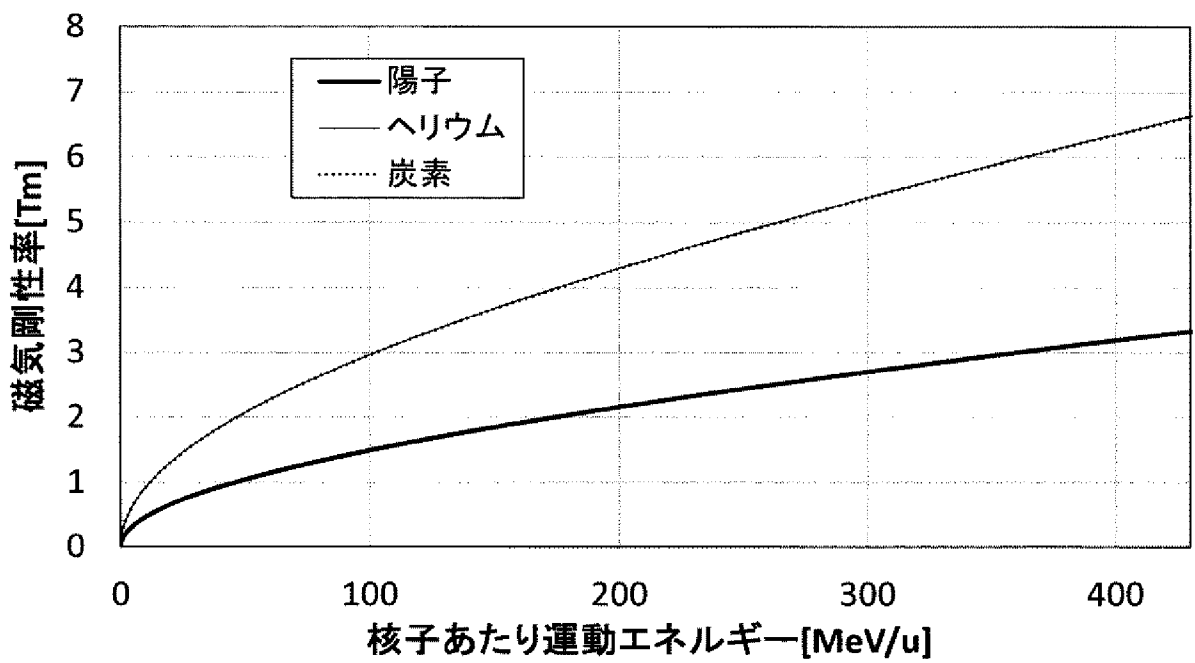
[図2]



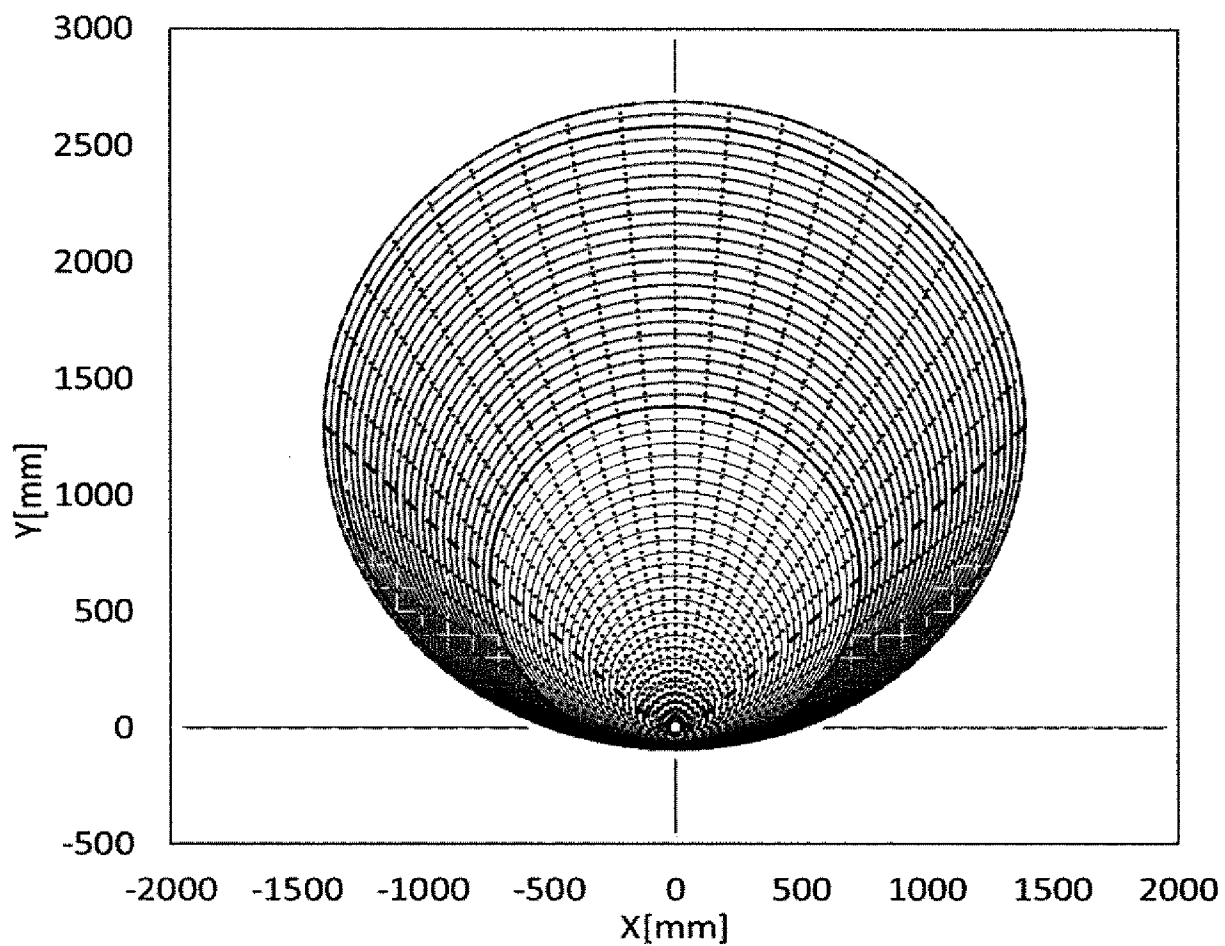
[図3]



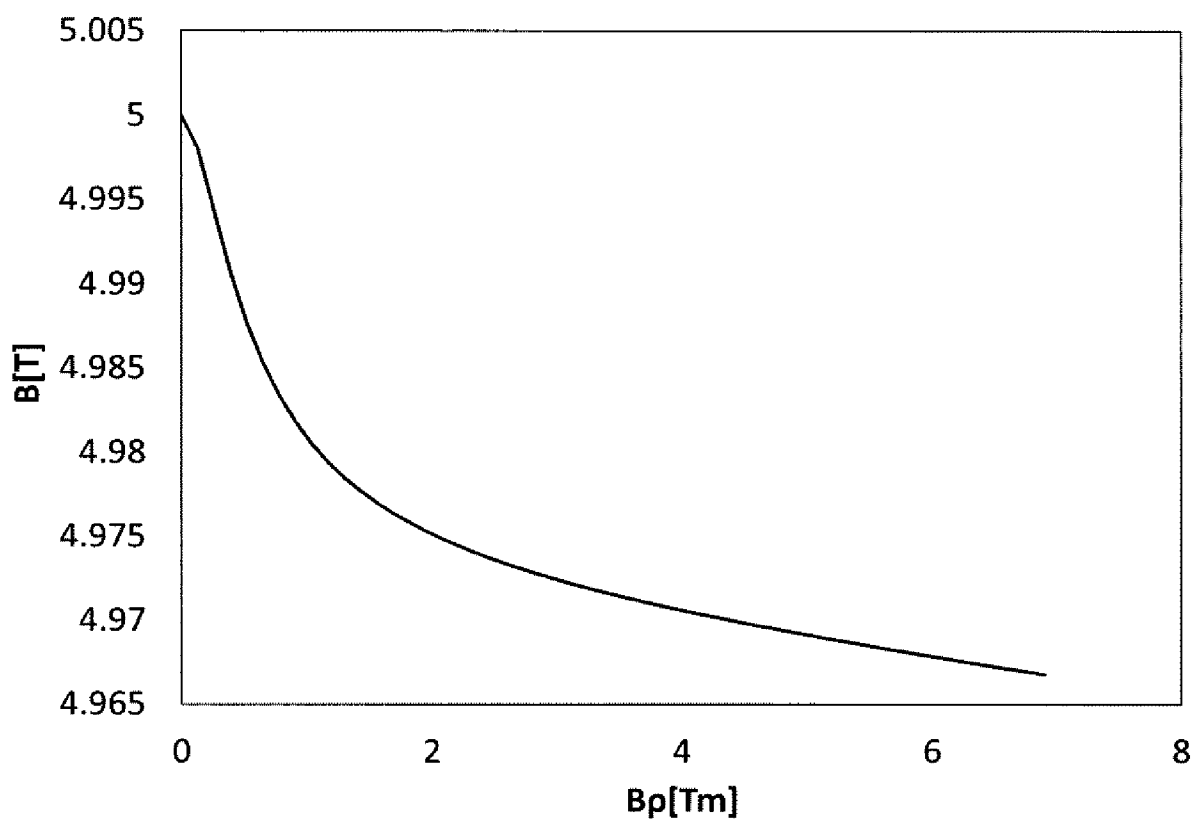
[図4]



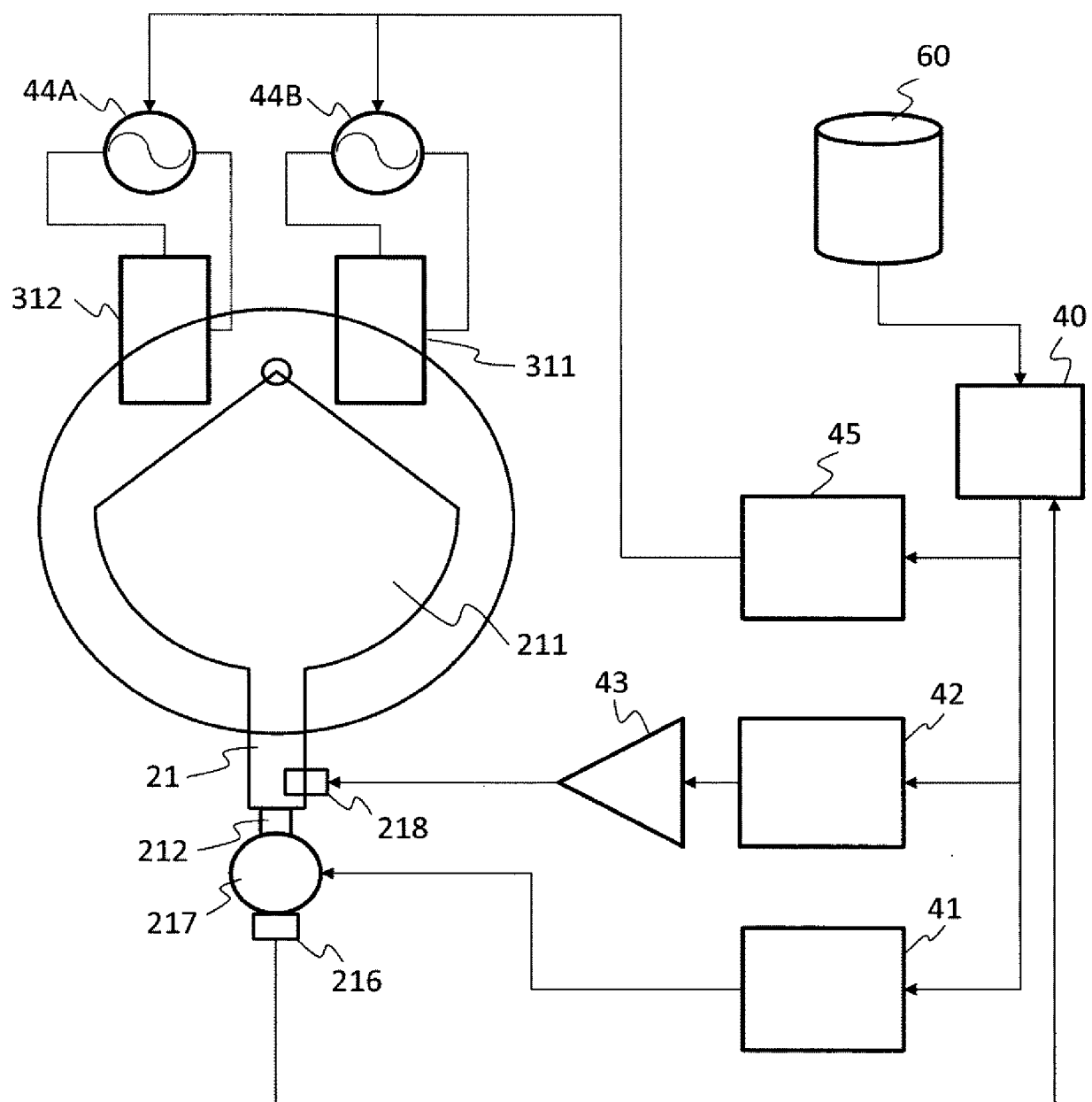
[図5]



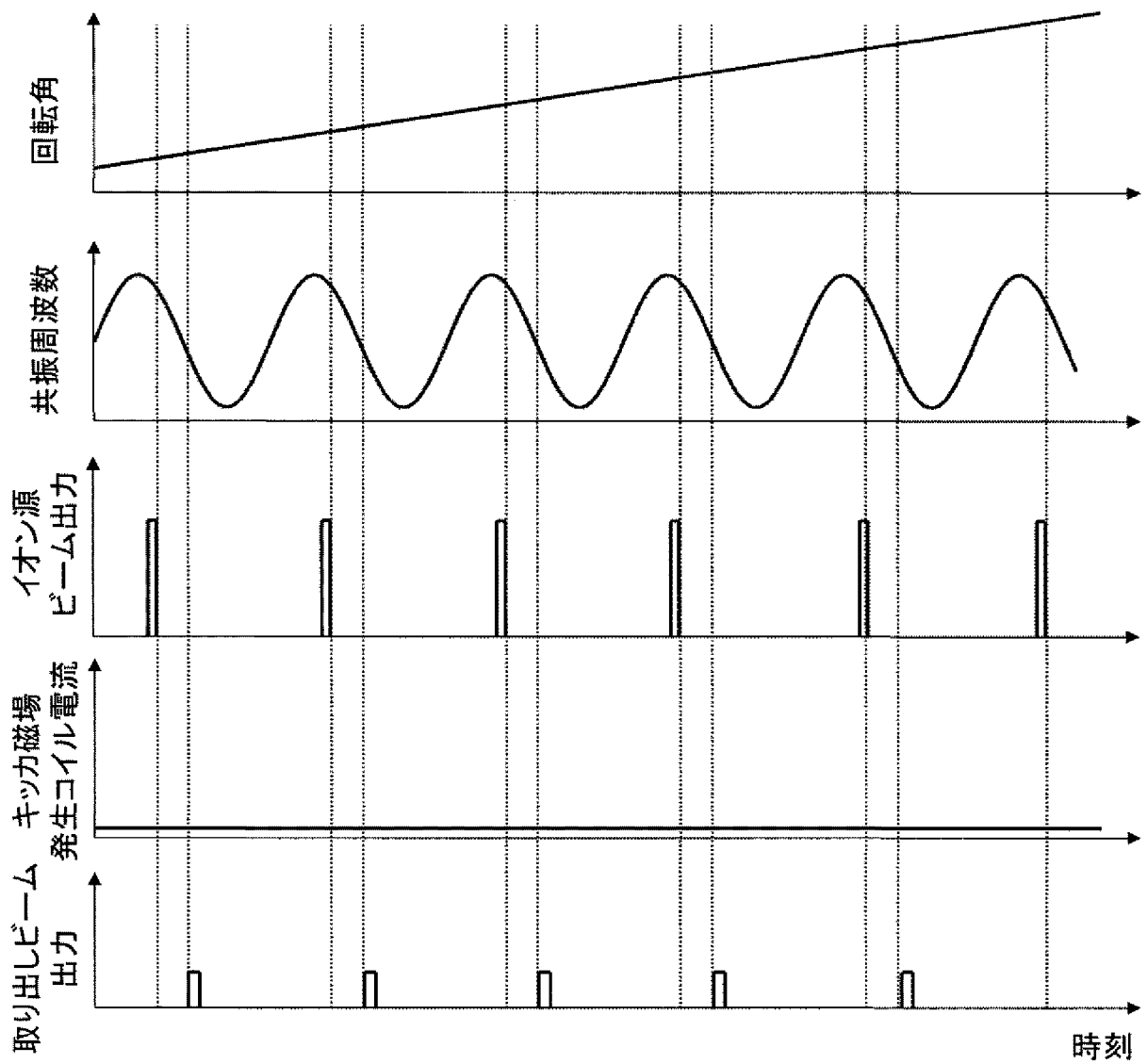
[図6]



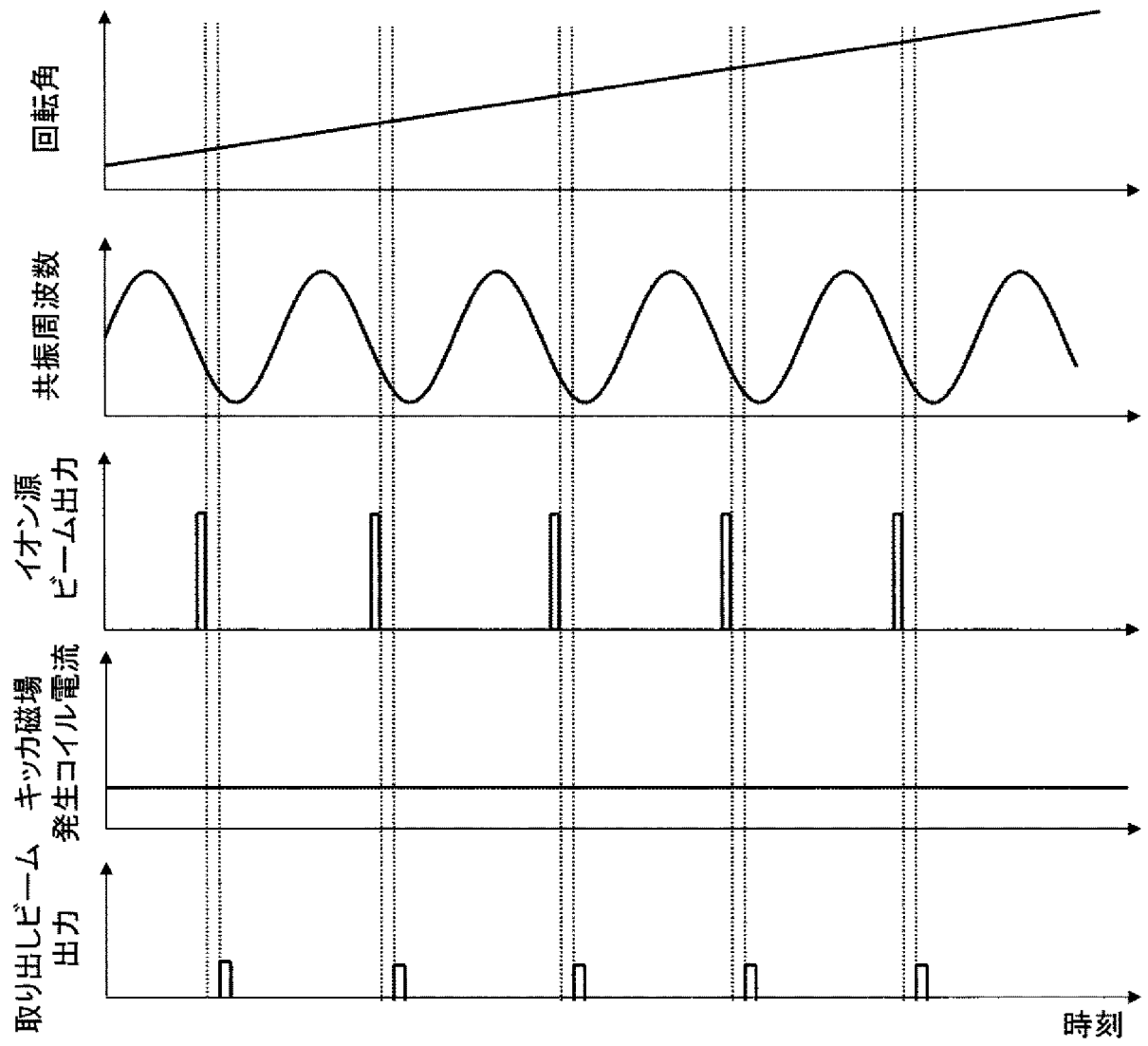
[図7]



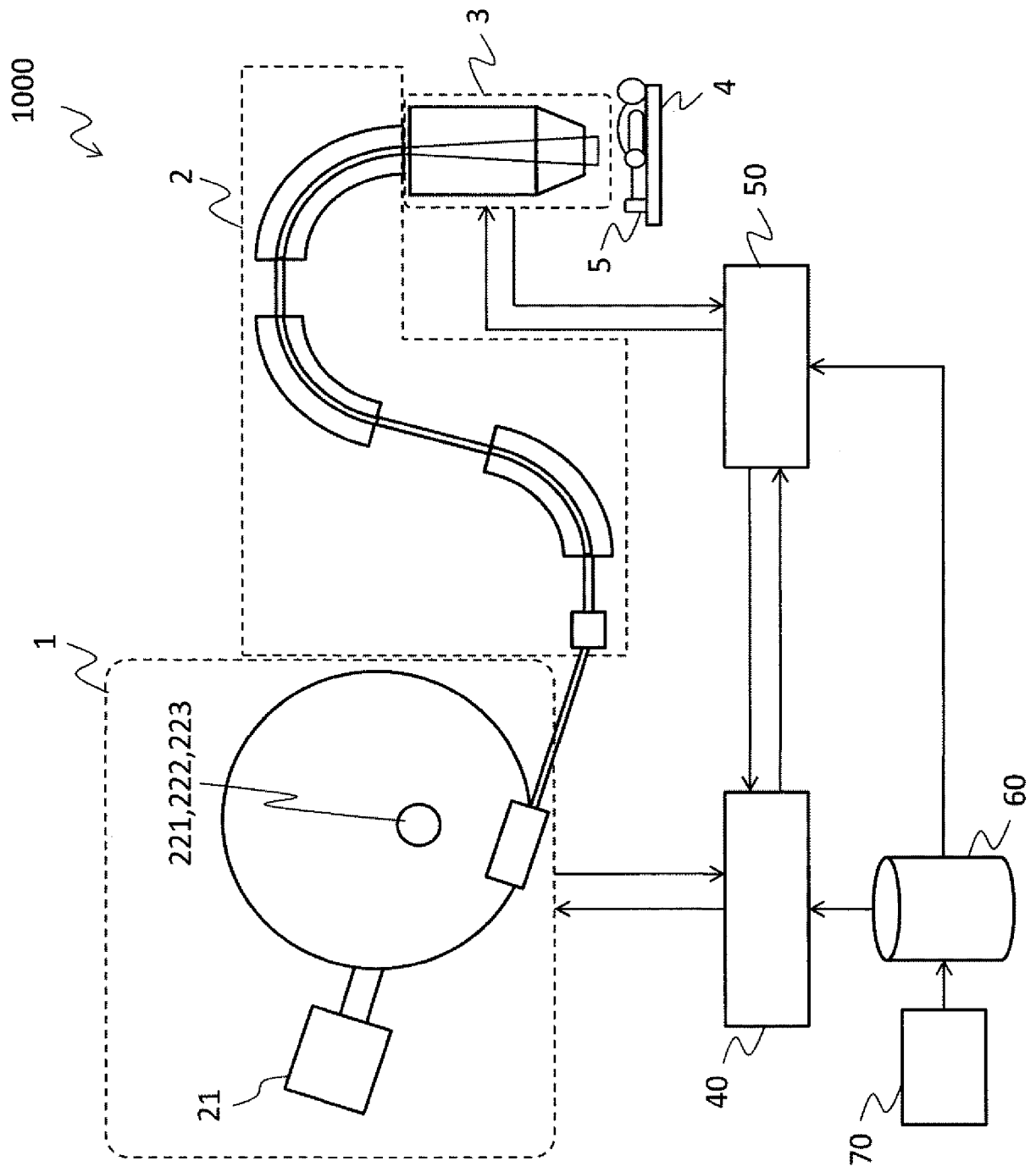
[図8]



[図9]



[図10]



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2018/037622

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

Int.Cl. H05H13/02 (2006.01) i, 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)

Int.Cl. H05H13/00, H05H13/02, A61N5/10

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

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2018
Registered utility model specifications of Japan	1996-2018
Published registered utility model applications of Japan	1994-2018

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

JSTPlus (JDreamIII)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2015-84886 A (HITACHI, LTD.) 07 May 2015, entire text, all drawings & US 2015/0115179 A1, entire text, all drawings & EP 2868347 A1 & EP 3020452 A1 & CN 104548387 A	1-5
A	JP 2005-302734 A (HITACHI, LTD.) 27 October 2005, paragraphs [0022]-[0068], fig. 1-4 (Family: none)	1-5
A	WO 2016/092621 A1 (HITACHI, LTD.) 16 June 2016, entire text, all drawings & US 2017/0303384 A1, entire text, all drawings	1-5
A	WO 2016/092623 A1 (HITACHI, LTD.) 16 June 2016, entire text, all drawings & US 2017/0339778 A1, entire text, all drawings & EP 3232742 A1 & CN 107006115 A	1-5

Further documents are listed in the continuation of Box C.       See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“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
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“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
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“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
“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)	“&” document member of the same patent family
“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	

Date of the actual completion of the international search 29 November 2018 (29.11.2018)	Date of mailing of the international search report 11 December 2018 (11.12.2018)
--	---

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer  Telephone No.
--	---

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. H05H13/02(2006.01)i, 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. H05H13/00, H05H13/02, A61N5/10		
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 1971-2018年 日本国実用新案登録公報 1996-2018年 日本国登録実用新案公報 1994-2018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） JSTPlus (JDreamIII)		
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	JP 2015-84886 A（株式会社日立製作所） 2015.05.07, 全文および全図 & US 2015/0115179 A1, 全文および全図 & EP 2868347 A1 & EP 3020452 A1 & CN 104548387 A	1-5
A	JP 2005-302734 A（株式会社日立製作所） 2005.10.27, 第[0022]-[0068]段落および第1-4図 (ファミリーなし)	1-5
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <span style="margin-left: 200px;"><input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。</span>		
* 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 29.11.2018	国際調査報告の発送日 11.12.2018	
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） 藤本 加代子 電話番号 03-3581-1101 内線 3226	2G 4458

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 2016/092621 A1 (株式会社日立製作所) 2016.06.16, 全文および全図 & US 2017/0303384 A1, 全文および全図	1 - 5
A	WO 2016/092623 A1 (株式会社日立製作所) 2016.06.16, 全文および全図 & US 2017/0339778 A1 , 全文および全図 & EP 3232742 A1 & CN 107006115 A	1 - 5