

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2007-18849

(P2007-18849A)

(43) 公開日 平成19年1月25日(2007.1.25)

(51) Int. Cl. F I テーマコード (参考)  
 H05H 13/04 (2006.01) H05H 13/04 M 2G085  
 H05H 13/04 N

審査請求 有 請求項の数 3 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2005-198557 (P2005-198557)	(71) 出願人	504151365 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 茨城県つくば市大穂1番地1
(22) 出願日	平成17年7月7日(2005.7.7)	(74) 代理人	100093816 弁理士 中川 邦雄
		(72) 発明者	鳥飼 幸太 茨城県つくば市大穂1-1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内
		(72) 発明者	高山 健 茨城県つくば市大穂1-1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内
		(72) 発明者	下崎 義人 茨城県つくば市大穂1-1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内 最終頁に続く

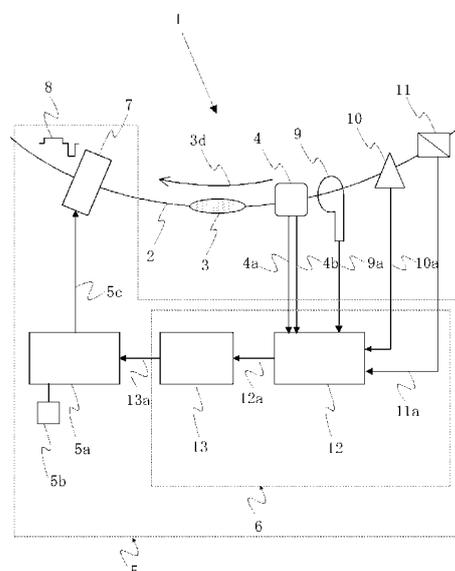
(54) 【発明の名称】 荷電粒子ビームの軌道制御装置及びその制御方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 荷電粒子ビームの軌道のズレを修正する軌道制御装置及び制御方法を提供すること。

【解決手段】 誘導加速セル7を用いたシンクロトロン1において、シンクロトロン1の設計軌道2にある荷電粒子ビームの設計軌道2からのズレを感知する位置モニター11からの位置シグナル11a及びバンチ3の通過を感知するバンチモニター9からの通過シグナル9aを受けて、誘導電圧の発生タイミングを制御するデジタル信号処理装置12と、デジタル信号処理装置12で生成されたゲート親信号12aを基にスイッチング電源5aのオンおよびオフ制御するゲート信号パターン13aを生成するパターン生成器13からなる荷電粒子ビームの軌道制御装置6。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、前記シンクロトロンの設計軌道にある荷電粒子ビームの設計軌道からのズレを感知する位置モニターからの位置シグナル、及びバンチの通過を感知するバンチモニターからの通過シグナルを受けて、誘導電圧の発生タイミングを制御するデジタル信号処理装置と、前記デジタル信号処理装置で生成されたゲート親信号を基にスイッチング電源のオンおよびオフ制御するゲート信号パターンを生成するパターン生成器からなることを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御装置。

## 【請求項 2】

前記デジタル信号処理装置が、磁場励磁パターンを基に計算される理想的な可変遅延時間パターンに対応する必要な可変遅延時間パターンを格納し、前記必要な可変遅延時間パターンに基づき可変遅延時間シグナルを生成する可変遅延時間計算機と、荷電粒子ビームが周回する設計軌道にあるバンチモニターからのバンチの通過シグナル、前記可変遅延時間計算機からの可変遅延時間シグナルを受けて、可変遅延時間に相当するパルスを生成する可変遅延時間発生器と、磁場励磁パターンを基に計算される理想的な加速電圧値パターンに対応する等価的な加速電圧値パターンを格納し、前記可変遅延時間発生器からの可変遅延時間に相当するパルス、及び設計軌道にある荷電粒子ビームの設計軌道からのズレを感知する位置モニターからの位置シグナルを受けて、加速用の誘導電圧のオンオフを制御するパルスを生成する加速電圧演算機、及び前記加速電圧演算機からのパルスを受けて、パターン生成器に適したパルスであるゲート親信号を生成するゲート親信号出力器からなることを特徴とする請求項 1 記載の荷電粒子ビームの軌道制御装置。

## 【請求項 3】

誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、可変遅延時間シグナルを生成する可変遅延時間計算機と、荷電粒子ビームが周回する設計軌道にあるバンチモニターからのバンチの通過シグナル、前記可変遅延時間計算機からの可変遅延時間シグナルを受けて、可変遅延時間に相当するパルスを生成する可変遅延時間発生器と、前記可変遅延時間発生器からの可変遅延時間に相当するパルス、及び設計軌道にある荷電粒子ビームの設計軌道からのズレを感知する位置モニターからの位置シグナルを受けて、加速用の誘導電圧のオンオフを制御するパルスを生成する加速電圧演算機と、前記加速電圧演算機からのパルスを受けて、パターン生成器に適したパルスであるゲート親信号を生成するゲート親信号出力器からなるデジタル信号処理装置、及び前記ゲート親信号をスイッチング電源のゲート信号パターンへと変換するパターン生成器により、制御単位のパルス密度を制御することを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、誘導電圧の発生タイミングを制御することにより、荷電粒子ビームを設計軌道に維持することのできる荷電粒子ビームの軌道制御装置及びその制御方法に関する。

## 【0002】

ここで、荷電粒子とは、元素の周期表のある種の元素が一定の正または負の電価状態にあるイオンおよび電子に始まる「電荷を持った粒子」の総称をいう。また、荷電粒子には、化合物、タンパク質などの構成分子数の大きな粒子も含む。

## 【背景技術】

## 【0003】

シンクロトロンには、高周波シンクロトロン、誘導加速セルを用いたシンクロトロンがある。高周波シンクロトロンは、入射機器により真空ダクト内に入射した陽子などの荷電粒子を、高周波加速空洞によって、高周波シンクロトロンを構成する、ビーム周回軌道を維持する偏向電磁石の磁場励磁パターンに同期した高周波加速電圧を印加して、加速しながら荷電粒子を真空ダクト中の荷電粒子ビームが周回する設計軌道を周回させる円形加速

器である。

【0004】

一方、誘導加速セルを用いたシンクロトロンは、高周波シンクロトロンと加速方法が異なり、誘導加速セルによって誘導電圧を荷電粒子ビームに印加して加速する円形加速器である。

【0005】

図8に誘導加速セルによる荷電粒子ビームの加速原理と、誘導電圧の種類について示した。誘導加速セルには、荷電粒子ビームを進行軸方向に閉じ込めるための閉込用誘導加速セル（以下、閉込用誘導加速セルという。）と、荷電粒子ビームを進行軸方向に加速するための誘導電圧を印加する誘導加速セル（以下、加速用誘導加速セルという。）がある。

10

【0006】

なお、閉込用誘導加速セルに代えて、荷電粒子ビームを進行軸方向に閉じ込めるために高周波加速空洞を用いることもある。

【0007】

図8(A)は、閉込用誘導加速セルによる荷電粒子ビームの閉じ込めの様子を示している。閉込用誘導加速セルによって荷電粒子ビームに印加する誘導電圧をバリアー電圧22という。

【0008】

特に、荷電粒子群（以下、バンチ3という。）の先端に印加する荷電粒子ビームの進行軸方向と逆向きの誘導電圧のことを負のバリアー電圧22aといい、バンチ3の尾部に印加する荷電粒子ビームの進行軸方向と同一方向の誘導電圧を正のバリアー電圧22bという。これは、従来の高周波と同様に荷電粒子ビームに位相安定性を与えるものである。

20

【0009】

なお、横軸tは、加速用誘導加速セル内の時間的変化であり、縦軸vは、印加させるバリアー電圧値（図8(B)においては、加速用の誘導電圧値）である。

【0010】

図8(B)は、加速用誘導加速セルによる荷電粒子ビームの加速の様子を示している。加速用誘導加速セルによって荷電粒子ビームに印加する誘導電圧を加速用の誘導電圧8という。特に、バンチ3の全体に印加する荷電粒子ビームの進行軸方向の加速に必要な加速用の誘導電圧8のことを加速電圧8aといい、その電圧値を加速電圧値8iという。

30

【0011】

また、加速用誘導加速セルにバンチ3が存在しない時間に、加速電圧8aと異極の加速用の誘導電圧8をリセット電圧8bという。このリセット電圧8bは、加速用誘導加速セルの磁氣的飽和を回避するためのものである。

【0012】

これら加速用の誘導電圧8、及びバリアー電圧22によって、従来の高周波シンクロトロンのように、陽子や一定の荷電粒子に限らず、任意の荷電粒子を一台の円形加速器でシンクロトロンを構成する偏向電磁石の磁場強度が許す任意のエネルギーレベル（以下、任意のエネルギーレベルという。）に加速することができると考えられている。

【0013】

さらに、誘導加速セルを使用することにより、従来の高周波シンクロトロンで加速していた荷電粒子ビームの長さ比べて数倍から10倍の時間幅を持つ、1マイクロ秒もの長さをしたバンチ3（スーパーバンチ）を加速することも可能になる。これにより原子核物理・高エネルギー物理の実験が飛躍的に進歩すると考えられている。

40

【非特許文献1】日本物理学会誌 vol. 59, No. 9 (2004) p 601 - p 610

【0014】

ここで誘導加速セルとは、これまで作られてきた線形誘導加速器用の誘導加速セルと原理的には同じ構造である。誘導加速セルは、内筒、及び外筒からなる2重構造で、外筒の内に磁性体が挿入されてインダクタンスを作る。荷電粒子ビームが通過する真空ダクトと

50

接続された内筒の一部がセラミックなどの絶縁体でできている。

【0015】

磁性体を取り囲む1次側の電気回路にDC充電器からパルス電圧を印加すると、1次側導体には1次電流(コア電流)が流れる。この1次電流は1次側導体の周りに磁束を発生させ、1次側導体に囲まれた磁性体が励磁される。

【0016】

これによりトロイダル形状の磁性体を貫く磁束密度が時間的に増加する。このとき絶縁体を挟んで、導体の内筒の両端部である2次側の絶縁部にファラデーの誘導法則にしたがって誘導電場が誘導される。この誘導電場が加速電場となる。この加速電場が生じる部分を加速ギャップという。従って、誘導加速セルは1対1のトランスであるといえる。

10

【0017】

誘導加速セルの1次側の電気回路にパルス電圧を発生させるスイッチング電源を接続し、前記スイッチング電源を外部からオンおよびオフすることで、加速電場の発生を自由に制御することができる。

【0018】

ここで、スイッチング電源、及び加速用誘導加速セルの等価回路について説明する(図9)。加速用誘導加速装置の等価回路23は、DC充電器5bから常時給電を受けるスイッチング電源5aが、伝送線を経由して加速用誘導加速セル7に繋がったものとして表すことができる。加速用誘導加速セル7は誘導成分L、容量成分C、抵抗成分Rの並列回路で示す。並列回路の両端電圧がバンチ3が感じる加速用の誘導電圧8である。

20

【0019】

図9の回路状態は、第1スイッチ24a、及び第4スイッチ24dがゲート信号パターン13aによりオンになっており、バンクコンデンサ24に充電された電圧が加速用誘導加速セル7に印加され、加速ギャップ7aにバンチ3を加速するための加速電圧8aが生じている状態である。

【0020】

次にオンになっていた第1スイッチ24a、及び第4スイッチ24dがゲート信号パターン13aによりオフになり、第2スイッチ24b、及び第3スイッチ24cがゲート信号パターン13aによりオンになって、前記加速ギャップ7aに前記誘導電圧と逆向きであるリセット電圧8bが生じ、加速用誘導加速セル7の磁性体の磁氣的飽和をリセットする。

30

【0021】

そして、第2スイッチ24b、及び第3スイッチ24cがゲート信号パターン13aによりオフになり、第1スイッチ24a、及び第4スイッチ24dがオンになる。このような一連のスイッチング動作をゲート信号パターン13aにより繰り返すことで、荷電粒子ビームの加速に必要な加速用の誘導電圧8を発生させることが可能となる。

【0022】

前記、ゲート信号パターン13aは、スイッチング電源5aの駆動を制御する信号であり、バンチ3の通過シグナル9aを基に、デジタル信号処理装置12、及びパターン生成器13からなる加速用誘導電圧制御装置でデジタル制御される。

40

【0023】

なお、バンチ3に印加された加速電圧8aは、回路中の電流値とマッチング抵抗25との積から計算された値と等価である。従って、電流計である誘導電圧モニター26などで電流値を測定することで印加した加速電圧8aの値を知ることができる。

【0024】

既に、発明者等は高エネルギー加速器研究機構(以下、KEKという。)の陽子高周波シンクロトロン(以下、12GeVPSという。)内に加速用誘導加速セル7を設置し、高周波加速空洞と加速用誘導加速セル7とを組み合わせることにより、一定間隔で発生させる加速用の誘導電圧8によって、運動エネルギー5億電子ボルトで入射された陽子ビームを80億電子ボルトまで加速することに成功している。

50

## 【0025】

ここで電子ボルトとは、電圧の単位であるボルトに電子の単位電荷を乗じたものを1電子ボルトとして与えられるものである。1電子ボルトは $1.602 \times 10^{-19}$ ジュールに等しい。

【非特許文献2】Phys. Rev. Lett. Vol. 94, No. 144801-4 (2005)。

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0026】

図10に、荷電粒子ビームの軌道と磁場による水平方向の閉じ込めの様子を示した。シンクロトロンはシンクロトロンを構成する偏向電磁石による磁場強度3aによって、パンチ3を設計軌道2上に維持している。 10

## 【0027】

偏向電磁石による磁場強度3aがなければ、パンチ3は、荷電粒子ビームがもつ遠心力3bにより、真空ダクトの壁面に衝突して失われる。この磁場強度3aは、加速時間とともに変化する。その変化を磁場励磁パターン(図5)という。この磁場励磁パターンは、一旦加速する荷電粒子の種類、加速エネルギーレベル、円形加速器の周長を決定すると、荷電粒子ビームの周回周波数バンド幅が一意に定まる。

## 【0028】

従って、加速用の誘導電圧8を、高周波加速電圧と同様に、この磁場励磁パターンに同期して進行軸方向に加速する電圧を荷電粒子ビームに印加しなければならない。 20

## 【0029】

荷電粒子ビームの軌道は、シンクロトロンの真空ダクト中心2aではなく、シンクロトロンを構成する偏向電磁石の配置によって定められた、真空ダクト中心2aより外側、又は内側の周回する設計軌道2である。なお、 $r_0$ は円形加速器の中心から、真空ダクト中心2aまでの平均半径2dである。

## 【0030】

ここで、同期とは、シンクロトロンを構成する偏向電磁石の磁場強度3aに基づくローレンツ力と、荷電粒子ビームの加速により外向きに働く遠心力3bとのバランスを取るよう、磁場励磁パターンの変化に合わせて加速電圧8aを荷電粒子ビームに印加することをいう。 30

## 【0031】

しかし、パンチ3の周回毎に印加する加速電圧値8iは一定ではなく、多少の増減がある。これは、バンクコンデンサー24の充電電圧が理想値からズれることなど種々の要因に由来する。

## 【0032】

その結果、磁場励磁パターンに同期するため理想的な加速電圧値8iより、実際に印加された加速電圧値8iが過小であった場合は、荷電粒子ビームは設計軌道2から内側2bにズれることとなる。一方、理想的な加速電圧値8iより、実際に印加した加速電圧値8iが過剰であった場合は、荷電粒子ビームが設計軌道2から外側2cにズれる。 40

## 【0033】

従来の高周波シンクロトロンにおいては、高周波の位相を加速方向、減速方向にずらすことで、荷電粒子ビームを加速および減速し、荷電粒子ビームを設計軌道2上に加速中維持することが可能であった。

## 【0034】

しかし、閉込用誘導加速セルにおいては、バリアー電圧22の発生時間をずらすことは可能であるが、一端、設計軌道2から外側2cにズれたパンチ3を、すなわち磁場励磁パターンに同期できなくなったパンチ3を設計軌道2に戻すことはできない。

## 【0035】

また、従来からステアリング磁石などによって、実際の陽子ビームの周回する軌道を設 50

計軌道 2 上に補正することも行われている。しかし、ステアリング磁石による補正は、設計軌道 2 よりズレたパンチ 3 を局所的に補正するものである。

【0036】

磁場強度 3 a は荷電粒子ビームに運動エネルギーを与えることができないため、荷電粒子ビームの周回速度 3 c が磁場励磁パターンよりズレる。従って、荷電粒子エネルギーが設計値から外れたパンチ 3 を設計軌道 2 に修正することはできない。

【0037】

さらに、荷電粒子ビームを設計軌道 2 に修正する方法としては、加速電圧値 8 i の大きさを変更することが考えられる。しかし、加速電圧値 8 i を発生する装置（以下、加速用誘導加速装置という。）は、加速用誘導加速セル 7 が必要とする数十 kW の安定した出力電力を得るために、パルス電圧の振幅を定めるスイッチング電源 5 a の高圧充電部には大きなバンクコンデンサー 2 4（静電容量）を装荷しなければならない。

10

【0038】

このバンクコンデンサー 2 4 の充電圧はパルス電圧の出力安定を目的とするため、高速に変化できない。このため現実的にはパルス電圧の振幅を高速に制御させることができない。

【0039】

従って、使用する DC 充電器 5 b、バンクコンデンサー 2 4 が定まれば、出力電圧は一意に定まるため、電圧値を大きく、短時間で変化させることはできない。このためパルス電圧の振幅を変化させる方法では、加速電圧 8 a を磁場励磁パターンに同期させることができない。

20

【0040】

或いは、高周波加速空洞を荷電粒子ビームの軌道制御用として併用することも考えられる。しかし、任意の荷電粒子を一台のシンクロトロンで任意のエネルギーレベルに加速するためには、高周波加速空洞を使用することは現実的に不可能である。

【0041】

なぜなら、磁場励磁パターンに荷電粒子ビームの周回周波数を同期させる必要があるが、特に重い荷電粒子では、入射直後から加速終了時点までの周回周波数が極低周波になる。

【0042】

全ての高周波加速空洞では、インダクタンスとコンデンサーの共振原理によって高周波電圧を発生させるが、高周波電圧の周波数はインダクタンスのほぼ  $1/2$  乗に比例するため、発生できる高周波加速電圧の周波数に限界がある。このため高周波加速空洞では必要な高周波加速電圧を印加することができないからである。

30

【0043】

また、高周波を使用する原理的限界から、高周波加速空洞を用いたシンクロトロンでは、加速できる荷電粒子の質量番号 A と電価数 Z の比である  $Z/A$  が異なる場合、加速中の周波数変化自体を変えなければならない。

【0044】

上述した印加させる加速電圧値 8 i の誤差を解消しなければ、誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいては、一端必要な加速電圧値 8 i よりも高い、加速電圧値 8 i を荷電粒子ビームが受けてしまうと、荷電粒子ビームのもつ遠心力 3 b によって、設計軌道 2 の外側 2 c にズレてしまい、荷電粒子ビームを加速することができない。

40

【0045】

そこで、本発明は上記問題を解決するため、荷電粒子ビームの一定の周回数をひとまとめにした単位であり、理想的な加速電圧値 8 i と一定時間で等価的な加速電圧値 8 i を与える単位（以下、制御単位（図 6）という。）において、理想的な加速電圧値 8 i に対応する等価的な加速電圧値 8 i（以下、パルス密度（図 7）という。）を、リアルタイムで補正して、補正したパルス密度に基づく加速電圧 8 a を荷電粒子ビームに印加することで、荷電粒子ビームの軌道のズレを修正する軌道制御装置及びその制御方法を提供すること

50

を目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

【0046】

誘導加速セルを用いたシンクロトロン1において、磁場励磁パターン19を基に計算される理想的な可変遅延時間パターン18aに対応する必要な可変遅延時間パターン18bを格納し、前記必要な可変遅延時間パターン18bに基づき可変遅延時間18に相当する可変遅延時間シグナル14aを生成する可変遅延時間計算機14と、バンチ3が周回する設計軌道2にあるバンチモニター9からのバンチ3の通過シグナル9a、前記可変遅延時間計算機14からの可変遅延時間シグナル14aを受けて、可変遅延時間18に相当するパルス15aを生成する可変遅延時間発生器15と、磁場励磁パターン19を基に計算される理想的な加速電圧値パターン8cに対応する等価的な加速電圧値パターン8dを格納し、前記可変遅延時間発生器15からの可変遅延時間18に相当するパルス15a、及び設計軌道2にある荷電粒子ビームの設計軌道2からのズレを感知する位置モニター11からの位置シグナル11aを受けて、加速用の誘導電圧8のオンオフを制御するパルス16aを生成する加速電圧演算機16と、及び前記加速電圧演算機16からのパルス16aを受けて、パターン生成器13に適したパルスであるゲート親信号12aを生成するゲート親信号出力器17からなるデジタル信号処理装置12、及び前記デジタル信号処理装置12で生成されたゲート親信号12aを基にスイッチング電源5aのオンおよびオフ制御するゲート信号パターン13aを生成するパターン生成器13からなることを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御装置6の構成とした。

10

20

【発明の効果】

【0047】

本発明は、以上の構成であるから以下の効果が得られる。誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、荷電粒子ビームの軌道のズレを修正することで、安定かつ確実に任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルに加速することができることとなった。

【0048】

さらに、誘導加速セルによって荷電粒子ビームの軌道のズレを修正することができるため、高周波加速空洞を用いる必要がなく、閉じ込め機能を閉込用誘導加速セルに行わせることが可能となり、その結果、従来の高周波シンクロトロンの装置を利用して、任意の荷電粒子に対応した誘導加速セルを用いたシンクロトロンを低コストでつくることが可能になった。

30

【0049】

また、あらゆるシンクロトロンの運転方式、すなわち、あらゆる偏向電磁石の磁場励磁パターンに同期させて、荷電粒子ビームの軌道のズレを修正することができる。

【0050】

加えて、荷電粒子ビームを、設計軌道2に対して、内側2b、又は外側2cの任意の軌道を周回させることもできる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0051】

誘導加速セルを用いたシンクロトロン1において、磁場励磁パターン19を基に計算される理想的な可変遅延時間パターン18aに対応する必要な可変遅延時間パターン18bを格納し、前記必要な可変遅延時間パターン18bに基づき可変遅延時間18に相当する可変遅延時間シグナル14aを生成する可変遅延時間計算機14と、荷電粒子ビームが周回する設計軌道2にあるバンチモニター9からのバンチ3の通過シグナル9a、前記可変遅延時間計算機14からの可変遅延時間シグナル14aを受けて、可変遅延時間18に相当するパルス15aを生成する可変遅延時間発生器15と、磁場励磁パターン19を基に計算される理想的な加速電圧値パターン8cに対応する等価的な加速電圧値パターン8dを格納し、前記可変遅延時間発生器15からの可変遅延時間18に相当するパルス15a、及び設計軌道2にある荷電粒子ビームの設計軌道2からのズレを感知する位置モニター11からの位置シグナル11aを受けて、加速用の誘導電圧8のオンオフを制御するパル

40

50

ス16aを生成する加速電圧演算機16と、前記加速電圧演算機16からのパルス16aを受けて、パターン生成器13に適したパルスであるゲート親信号12aを生成するゲート親信号出力器17からなるデジタル信号処理装置12、及び前記ゲート親信号12aをスイッチング電源5aの電流路のオンおよびオフの組み合わせであるゲート信号パターン13aへと変換するパターン生成器13により、制御単位21のパルス密度20から過剰な加速電圧8aの印加を停止することを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御方法によって実現した。

【実施例1】

【0052】

以下に、添付図面に基づいて、本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置及びその制御方法について詳細に説明する。図1は本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置6を含む誘導加速セルを用いたシンクロトロンの概略図である。

10

【0053】

本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置6を利用するシンクロトロン1は、前段加速器により一定のエネルギーレベルまで加速され、入射された荷電粒子ビームが周回する設計軌道2を覆う真空ダクト、周回するバンチ3に強収束を保證する収束電磁石、偏向電磁石4など、バンチ3にバリアー電圧22を印加する閉込用誘導加速装置、バンチ3に加速用の誘導電圧8を印加する加速用誘導加速装置5、バンチ3の通過を知るためのバンチモニター9、バンチ3の加速速度をリアルタイムで測定するための速度モニター10、荷電粒子ビームが設計軌道2からどれだけ水平方向の内側2b、または外側2cにズレているかを検出する位置モニター11などからなる。

20

【0054】

偏向電磁石4は、荷電粒子ビームの軌道を円形状に維持するために使用する装置である。偏向電磁石4は鉄心、あるいは空芯に導体をコイル状に巻きつけた構造をしており、導体に電流を流すことで荷電粒子ビームの進行軸と垂直な磁場強度3aを発生させる。偏向電磁石4に発生している磁場強度3aは導体に流れる電流と比例関係にあるため、この比例係数をあらかじめ求めておき、電流量を測定して換算することで磁場強度3aを求めることができる。

【0055】

バンチモニター9は、バンチ3の通過を検出してパルスを出力する装置である。バンチモニター9は設計軌道2内に設置された導体、あるいは磁性体内を荷電粒子ビームが通過する際に生じる電磁エネルギーの一部を電圧または電流のパルスに変換するもので、バンチ3が通過する際に真空ダクトに誘起する壁電流を利用するものと、磁性体コアにコイルを巻きつけた形状の装置内をバンチ3が通過して生じる誘起電圧を利用する方法などがある。

30

【0056】

速度モニター10は、バンチ3の周回速度3cに応じた電圧値あるいは電流値、あるいはデジタル値を発生させる装置である。速度モニター10はバンチモニター9のように荷電粒子ビームが通過した際に発生する電圧パルスあるいは電流パルスを、コンデンサーに蓄積して電圧値に変換するアナログ構造のものと、電圧パルスの数自体をデジタル回路で

40

【0057】

位置モニター11は、バンチ3の設計軌道2に対するズレに比例した電圧値を出力する装置である。位置モニター11は、例えば、進行軸方向3dに対して斜めのスリットを持つ2枚の導体によって構成されており、荷電粒子ビームが通過した位置によって2枚の導体が荷電粒子ビームを感じる時間が異なり、結果として2枚の導体に誘起される電圧値に差が生じることを利用する。

【0058】

例えば、バンチ3が位置モニター11の中心を通過した場合、誘起される電圧は等しいため、二つの導体に発生した電圧を差分した出力電圧値は0であり、設計軌道2の外側2

50

c を通過した場合には中心からのズレに比例した正の電圧値、同様に内側 2 b を通過した場合には負の電圧値を出力する。

【 0 0 5 9 】

従って、偏向電磁石 4、パンチモニター 9、速度モニター 10、位置モニター 11 は、高周波シンクロトロン加速において用いられるものを利用することができる。

【 0 0 6 0 】

加速用誘導加速装置 5 は、パンチ 3 が周回する設計軌道 2 中に真空ダクトに接続され、パンチ 3 を進行軸方向 3 d に加速するための加速用の誘導電圧 8 を印加する加速用誘導加速セル 7、前記加速用誘導加速セル 7 にパルス電圧 5 c を与える高繰り返し動作可能なスイッチング電源 5 a、前記スイッチング電源 5 a に電力を供給する DC 充電器 5 b、前記スイッチング電源 5 a のオンおよびオフの動作をフィードバック制御して荷電粒子ビームの設計軌道 2 からのズレを修正する荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 などからなる。

10

【 0 0 6 1 】

本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 は、設計軌道 2 に設けられた各種検出器でリアルタイムに検出された荷電粒子ビームの情報である各種シグナルを受けて加速用の誘導電圧 8 の発生タイミングを計算するデジタル信号処理装置 12、及び前記デジタル信号処理装置 12 より出力されたゲート親信号 12 a を基にスイッチング電源 5 a のオンおよびオフを駆動するゲート信号パターン 13 a を生成するパターン生成器 13 からなる。

【 0 0 6 2 】

ゲート親信号 12 a は、通過シグナル 9 a と同様に、荷電粒子ビームと加速用の誘導電圧 8 のタイミングを合わせるための可変遅延時間 ( 図 3 ) を経過した瞬間にデジタル信号処理装置 12 から出力される矩形の電圧パルスである。パターン生成器 13 はゲート親信号 12 a であるパルスの立ち上がりを認識することで動作を開始する。

20

【 0 0 6 3 】

パターン生成器 13 は、ゲート親信号 12 a をスイッチング電源 5 a の電流路のオンおよびオフの組み合わせへと変換する装置である。

【 0 0 6 4 】

スイッチング電源 5 a は一般に複数の電流路を持ち、その各枝路を通過する電流を調整し、電流の方向を制御することで負荷 ( ここでは加速用誘導加速セル 7 ) に正と負の電圧を発生する ( 図 9 ) 。

30

【 0 0 6 5 】

ゲート信号パターン 13 a とは、加速用誘導加速セル 7 の加速用の誘導電圧 8 を制御するパターンである。加速電圧 8 a を印加する際に、加速電圧 8 a の印加時間と発生タイミング、リセット電圧 8 b を印加する際に、リセット電圧 8 b の印加時間と発生タイミングを決定する信号と、加速電圧 8 a およびリセット電圧 8 b の間の休止時間を決定するための信号である。従って、ゲート信号パターン 13 a は加速するパンチ 3 の長さにあわせて調節が可能である。

【 0 0 6 6 】

加速用の誘導電圧 8 の発生タイミングの制御に使用される具体的シグナルは、偏向電磁石 4 から荷電粒子ビームが前段加速器から入射された瞬間に偏向電磁石 4 ( 円形加速器の制御装置を介して ) から出力されるサイクルシグナル 4 a、さらにリアルタイムの磁場励磁パターンであるビーム偏向磁場強度シグナル 4 b、パンチモニター 9 から荷電粒子ビームが該パンチモニター 9 を通過した情報である通過シグナル 9 a、パンチ 3 の周回速度 3 c である速度シグナル 10 a、及び位置モニター 11 から周回する荷電粒子ビームが設計軌道 2 からどれだけズレているかを示す情報である位置シグナル 11 a などである。

40

【 0 0 6 7 】

図 2 は、デジタル信号処理装置の構成図である。デジタル信号処理装置 12 は、可変遅延時間計算機 14、可変遅延時間発生器 15、加速電圧演算機 16、及びゲート親信号出力器 17 からなる。

50

## 【0068】

可変遅延時間計算機14は、可変遅延時間18を決定する装置である。可変遅延時間計算機14には、荷電粒子の種類に関する情報、後述の磁場励磁パターン(図5)を基に計算される可変遅延時間18の定義式が与えられている。

## 【0069】

荷電粒子の種類に関する情報とは、加速する荷電粒子の質量と電価数である。上述したように、荷電粒子が加速用の誘導電圧8から得るエネルギーは電価数に比例し、これによって得られる荷電粒子の周回速度3cは荷電粒子の質量に依存する。可変遅延時間18の変化は荷電粒子の周回速度3cに依存するため、これらの情報を予め与えておく。

## 【0070】

可変遅延時間18は、荷電粒子の種類、磁場励磁パターンが予め定まっているときは、予め計算し、必要な可変遅延時間パターン(図4)として与えることができる。

## 【0071】

しかし、予め計算しておく場合は、荷電粒子ビームが設計軌道2から内側2bまたは外側2cに外れた場合には、荷電粒子ビームの軌道の修正ができない。そこで、予め可変遅延時間18を計算した場合は、後述の加速電圧演算機16で加速電圧8aの修正を行うこととなる。

## 【0072】

また、可変遅延時間18をバンチ3の周回毎に、リアルタイムで計算する場合は、シンクロトロン1を構成する偏向電磁石4(円形加速器の制御装置を介して)からその時の磁場強度3aをビーム偏向磁場強度シグナル4bとして、可変遅延時間計算機14が受け取り、荷電粒子の種類に関する情報を与えることによって、予め計算する場合と同様に可変遅延時間18をバンチ3の周回ごとに計算すればよい。

## 【0073】

さらに、荷電粒子ビームの周回速度3cを測定する速度モニター10を使用し、リアルタイムで荷電粒子ビームの周回速度3cである速度シグナル10aを可変遅延時間計算機14に入力すれば、後述の式(6)、及び式(7)に従って、荷電粒子の種類に関する情報を与えることなく、リアルタイムで可変遅延時間18を計算することもできる。

## 【0074】

リアルタイムで可変遅延時間18を計算することにより、加速用誘導加速装置5を構成するDC充電器5b、バンクコンデンサー24等に起因して、印加する加速電圧値8iが所定の設定値から変動した場合、何らかの外乱によって、バンチ3の周回速度3cに突発的な変化が起こった場合であっても、加速電圧8aの発生タイミングを補正することで、荷電粒子ビームの軌道を修正することが可能となる。これを荷電粒子ビームの軌道制御という。

## 【0075】

すなわち、荷電粒子ビームの軌道制御を行うことによって、的確に加速電圧8aをバンチ3に印加することが可能となる。その結果、より効率的に荷電粒子ビームを加速することができることとなる。つまり、誘導加速セルによって、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルに加速することが可能となる。

## 【0076】

上述のようにして与えられた可変遅延時間18は、デジタルデータである可変遅延時間シグナル14aとして、可変遅延時間発生器15に出力される。

## 【0077】

なお、可変遅延時間計算機14には、偏向電磁石4(円形加速器の制御装置を介して)からサイクルシグナル4aが入力される。サイクルシグナル4aとは、荷電粒子ビームがシンクロトロン1に入射される際に偏向電磁石4(円形加速器の制御装置を介して)から発生するパルス電圧であり、加速開始の情報である。通常、シンクロトロン1は、荷電粒子ビームの入射、加速、出射を何度も繰り返す。

## 【0078】

10

20

30

40

50

従って、予め可変遅延時間 18 を開始している場合には、可変遅延時間計算機 14 は、加速の開始であるサイクルシグナル 4 a を得て、予め計算された可変遅延時間 18 に基づいて、可変遅延時間シグナル 14 a を可変遅延時間発生器 15 に出力する。

【0079】

可変遅延時間発生器 15 は、バンチモニター 9 からの通過シグナル 9 a、及び可変遅延時間計算機 14 からの可変遅延時間シグナル 14 a を受けて、バンチモニター 9 を通過したバンチ 3 毎に、次回のバンチ 3 の周回における加速用の誘導電圧 8 を発生させるタイミングを計算して、加速電圧演算機 16 に可変遅延時間 18 の情報であるパルス 15 a を出力する。

【0080】

可変遅延時間発生器 15 は、ある周波数を基準とするカウンターで、通過シグナル 9 a をデジタル信号処理装置 12 内に一定時間保持したのち通過させる機能を持つ装置である。

【0081】

例えば、1 kHz のカウンターであれば、カウンターの数値 1000 は、1 秒と等価である。すなわち、可変遅延時間発生器 15 に、可変遅延時間 18 に相当する数値を入力することで、可変遅延時間 18 の長さの制御を行うことができる。

【0082】

具体的には、可変遅延時間発生器 15 は、前記可変遅延時間計算機 14 によって出力された可変遅延時間 18 に相当する数値である可変遅延時間シグナル 14 a を基に、ゲート親信号 12 a の発生を可変遅延時間 18 に相当する時間の間停止する制御を行う。その結果、加速電圧 8 a の発生タイミングをバンチ 3 が加速用誘導加速セル 7 に到達した時間に合わせることができることとなる。

【0083】

例えば、可変遅延時間計算機 14 によって、150 という数値の可変遅延時間シグナル 14 a を上記 1 kHz のカウンターである可変遅延時間発生器 15 に出力した場合、可変遅延時間発生器 15 は、0.15 秒の間パルス 15 a の発生を遅らせる制御を行う。

【0084】

ここで、通過シグナル 9 a とは、バンチ 3 がバンチモニター 9 を通過した瞬間にあわせて発生するパルスである。パルスはそれを伝送する媒体あるいはケーブルの種類によって、適切な強度を持つ電圧型、電流型、光型などがある。

【0085】

前記通過シグナル 9 a は、デジタル信号処理装置 12 に荷電粒子ビームの通過タイミングを時間情報として与えるために用いられる。荷電粒子ビームの通過により、発生したパルスの立ち上がり部によって、設計軌道 2 での荷電粒子ビームの進行軸方向 3 d での位置が求められる。すなわち、通過シグナル 9 a は、可変遅延時間 18 の開始時間の基準である。

【0086】

加速電圧演算機 16 は、加速用の誘導電圧 8 を発生（オン）させるか、発生させない（オフ）かを決定する装置である。

【0087】

例えば、ある瞬間に必要な加速電圧値 8 i が 0.5 kV である場合、1 = パルス 16 a を発生させる、0 = パルス 16 a を発生させないと定義し、1.0 kV の一定値の加速電圧 8 a を用いて、バンチ 3 が 10 周回する間に周回毎に加速電圧 8 a を印加する、しないを、[1、0、・・・、1]（1 が 5 回、0 が 5 回）とすると、バンチ 3 が 10 周回の間を受けた平均的な加速電圧値（図 6）は 0.5 kV となる。このようにして、加速電圧演算機 16 が加速電圧 8 a をデジタル制御する。

【0088】

ある時間に必要な加速電圧値 8 i は、荷電粒子の種類、磁場励磁パターンが予め定められているときは、磁場励磁パターンから予め計算される理想的な加速電圧値パターン（図 5

10

20

30

40

50

)に対応する等価的な加速電圧値パターン(図5)として与えることができる。

【0089】

例えば、等価的な加速電圧値パターンとは、1秒間に加速電圧値 $\delta i$ を0Vから1kVまで変化させ、0.1秒間隔で制御する場合、等価的な加速電圧値パターンは、加速開始から0.1秒間は0kV、0.1~0.2秒間は0.1kV、0.2~0.3秒間は0.2kV・・・0.9~1.0秒間は1.0kVとする等のデータテーブルである。

【0090】

制御単位が $n$ 周であるとき、その間に加速電圧 $\delta a$ を $m$ 回荷電粒子ビームに与えた場合、荷電粒子ビームが制御単位の内に入る等価的な加速電圧値は、加速用誘導加速セル7の出力する加速電圧値 $\delta i$ の $m/n$ 倍になる。

10

【0091】

なお、 $m$ は $n$ より必ず小さくなることは明らかである。この条件は荷電粒子ビームの軌道が変化する速さに比べて、制御単位が十分短い場合に成り立つ。この制御単位は、制御単位を短くすることで電圧精度が下がり適切な電圧を与えられなくなる下限、及び制御単位を長くすることで軌道の変化に反応できなくなる上限の範囲内において、任意に選択することができる。

【0092】

例えば、制御単位を10周回とし、加速電圧値を $V_0$ とすると、加速電圧値を $0.1 \cdot V_0$ ごとに10段階に制御することができる。制御単位をバンチ3の20周回とすると、 $0.05 \cdot V_0$ ごとに20段階に等価的な加速電圧値パターンを制御することができる。

20

【0093】

しかし、上述のように、加速電圧 $\delta a$ が一定でないこと、また加速中の突発的なトラブルにより、荷電粒子ビームが設計軌道2よりズレた場合に軌道を修正するために、加速電圧 $\delta a$ の発生の停止、すなわちパルス密度(図6)の変更を行う必要がある(図7)。

【0094】

加速電圧演算機16で、荷電粒子ビームの軌道を修正するためには、予め、修正のための基礎データとして、どれだけの加速電圧値 $\delta i$ を荷電粒子ビームに与えると、どれだけ荷電粒子ビームの軌道が設計軌道2から外側2cへ移動するかの情報を加速電圧演算機16に与えておく必要がある。

【0095】

次に、加速電圧演算機16は、設計軌道2にある位置モニター11から、加速中のある時点において、荷電粒子ビームがどれだけ設計軌道2からズレているかを位置シグナル11aとして受け、荷電粒子ビームの軌道を修正するための計算をバンチ3の周回毎にリアルタイムで行う。

30

【0096】

荷電粒子ビームの軌道を制御単位の周回数 $n$ で修正するために必要な1周当たりの加速電圧は、現在の軌道半径を $r$ 、その時間微分を $r'$ 、磁場強度 $\delta a$ を $B$ 、その時間微分を $B'$ 、及び円形加速器の全長を $C_0$ とすると、次式(1)によって近似的に求められる。

$$V = C_0 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot (B' \cdot r + B \cdot r') \quad \dots \text{式(1)}$$

この $V$ は、制御単位における誘導加速セルで印加される平均的な加速電圧値である。

40

【0097】

$$V = (m/n) V_{acc} \quad (m < n) \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、 $V_{acc}$ は、後述の式(12)によって求められる、理想的な加速電圧値(図7)である。

【0098】

$r'$ および $B'$ は、1周当たりのバンチ3の周回時間を $t$ 、制御単位内の軌道半径を $r$ 、及び制御単位内の磁場強度 $\delta a$ の変化を $B$ 、 $t$ を周回数 $n$ だけ足し合わせた量を $t$ とすると、次式(3)、式(4)によって求められる。

$$r' = \frac{dr}{dt} \quad \dots \text{式(3)}$$

$$B' = \frac{dB}{dt} \quad \dots \text{式(4)}$$

50

なお、これらの  $\theta$ 、 $B$  は、リアルタイムで加速用の誘導電圧  $\theta$  を制御する場合は、加速電圧演算機 16 で計算する。

【0099】

1 周当たりのパンチ 3 の周回時間  $t$  は、速度モニター 10 などから得られた周回速度  $c$  を  $v$ 、及び円形加速器の全長を  $C_0$  とすると、次式 (5) で求められる。

$$t = C_0 / v \cdots \text{式 (5)}$$

この  $t$  は、パンチ 3 の周回ごとに異なる値をとる。

【0100】

これらの過程より加速電圧値を計算して、その計算結果に基づいて、必要な加速電圧  $\theta_a$  を印加する、又は、過剰な加速電圧値に相当する加速電圧  $\theta_a$  の印可を停止する。 10

【0101】

加速電圧  $\theta_a$  の印加を停止するとは、次回に予定されていた加速電圧  $\theta_a$  の発生自体を行わないことをいう。

【0102】

荷電粒子ビームの軌道が設計軌道 2 から外側 2c にズれるのは、荷電粒子ビームに印加された加速電圧値  $\theta_i$  が、その瞬間に必要な加速電圧値  $\theta_i$  より過剰であるため、偏向電磁石 4 の磁場励磁パターンと同期がとれないことによる (図 10)。

【0103】

従って、予め、又はリアルタイムで磁場励磁パターン (図 5) から計算される等価的な加速電圧値パターン (図 5) と、位置シグナル 11a によってえられる軌道のズレから、過剰な加速電圧値  $\theta_i$  を計算し、予め与えられている等価的な加速電圧値から過剰な加速電圧値  $\theta_i$  を減じたパルス密度 (図 7) に修正する。 20

【0104】

パルス密度を修正するとは、予め与えられていた、その瞬間に必要な加速電圧値  $\theta_i$ 、及び制御単位におけるパルス密度から、過剰分の加速電圧値  $\theta_i$  に相当する加速電圧  $\theta_a$  の印加を停止することによって可能である。

【0105】

なお、予め与えられる等価的な加速電圧値パターンとは別に、例えば、少しでも荷電粒子ビームが設計軌道 2 から外側 2c に外れた場合は、「大きく修正する」、「緩やかに修正する」などの荷電粒子ビームの軌道修正用のパルス密度などを予め与え、適宜必要なパルス密度を選択する方法で、荷電粒子ビームの軌道を制御することも可能である。 30

【0106】

なお、式 (1) の右辺を現代制御理論などから求められた、数値計算式によって表される任意の式に拡張することができることは当然である。

【0107】

このような制御法を採用することにより、円形加速器の大きさによって異なる荷電粒子ビームの軌道変動の様子に対しても適切な軌道制御が可能になる。

【0108】

なお、磁場励磁パターン、或いは等価的な加速電圧値パターン、修正用の基礎データ、修正用のパルス密度は書き換え可能なデータとして、選択した荷電粒子の種類、磁場励磁パターンによって変更できる。 40

【0109】

これらデータを書き換えるだけで、本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 を、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルに加速することにも利用することができる。

【0110】

又は、荷電粒子ビームの軌道を制御するためには、ある時間に必要な加速電圧値  $\theta_i$  は、パンチ 3 の周回毎にリアルタイムで計算することが必要である。ある時間に必要な加速電圧値  $\theta_i$  をリアルタイムで計算する場合は、誘導加速セルを用いたシンクロトロン 1 を構成する偏向電磁石 4 (円形加速器の制御装置を介して) からその時の磁場強度  $\theta_a$  をビーム偏向磁場強度シグナル 4b として受け取り、予め計算する場合と同様な演算式により 50

計算すればよい。

【0111】

リアルタイムで、ある時間に必要な加速電圧値  $8i$  を計算することにより、加速用誘導加速装置 5 を構成する DC 充電器 5b、バンクコンデンサ 24 等に起因して、印加する加速電圧値  $8i$  が所定の設定値から変動した場合であっても、加速電圧  $8a$  の発生タイミング、及び加速電圧値  $8i$  を補正することが可能となり、的確に加速電圧  $8a$  を荷電粒子ビームに印加することが可能となる。その結果、より効率的に荷電粒子ビームを加速することができることとなる。

【0112】

なお、図 9 で示した電流計である誘導電圧モニター 26 で得られる誘導電圧値である誘導電圧シグナル 26a をデジタル信号処理装置 12 の可変遅延時間計算機 14、及び加速電圧演算機 16 の一方、或いは両方にフィードバックすることでも、可変遅延時間 18、理想的な加速電圧値  $8i$  に対応する等価的な加速電圧値  $8i$  を計算することもできる。

【0113】

また、位置モニター 11 と誘導電圧モニター 26 とを併用することで、より精度よく荷電粒子ビームの軌道のズレを知ることができるため、荷電粒子ビームの軌道制御をより精度よく行うことができる。

【0114】

上述のようにして与えられた荷電粒子ビームの加速中のある時間に必要な加速電圧値  $8i$  を基にして決定された、ゲート親信号 12a の発生を制御するパルス 16a をゲート親信号出力器 17 に出力する。

【0115】

従って、加速電圧演算機 16 は、パンチモニター 9 から送られてくる通過シグナル 9a を用いて、単にパンチ 3 の周回ごとに加速電圧  $8a$  を毎回出力するのではなく、リアルタイムで荷電粒子ビームの軌道修正に必要な加速電圧値  $8i$  を測定し、加速電圧演算機 16 に予め与えられた等価的な加速電圧値パターン（図 6）に基づくパルス密度を修正するためにパルス 16a を間欠出力する機能を持つものである。

【0116】

ゲート親信号出力器 17 は、デジタル信号処理装置 12 を通過した可変遅延時間 18 と加速用の誘導電圧 8 のオンオフの両方の情報を含んだパルス 16a をパターン生成器 13 に伝達するためのパルス、すなわちゲート親信号 12a を発生させる装置である。

【0117】

ゲート親信号出力器 17 から出力されるゲート親信号 12a であるパルスの立ち上がり、加速用の誘導電圧 8 の発生タイミングとして用いられる。また、ゲート親信号出力器 17 は、加速電圧演算機 16 から出力されるパルス 16a を、パターン生成器 13 に伝送する媒体あるいはケーブルの種類によって、適切なパルス強度を持つ電圧型、電流型、光型などに変換する役割を持っている。

【0118】

上述のようにしてなるデジタル信号処理装置 12 は、荷電粒子ビームが周回する設計軌道 2 にあるパンチモニター 9 からの通過シグナル 9a を基に、スイッチング電源 5a の駆動を制御するゲート信号パターン 13a の基となるゲート親信号 12a をパターン生成器 13 に出力する。つまりデジタル信号処理装置 12 が加速用の誘導電圧 8 のオンおよびオフをデジタル制御しているといえる。

【0119】

リアルタイムで可変遅延時間 18、必要な加速電圧値  $8i$  を計算することにより、何ら設定を変更することなく、シンクロトロン 1 の磁場励磁パターンに対応して、荷電粒子ビームの周回周波数に同期した加速電圧  $8a$  を印加することが可能になった。

【0120】

図 3 は、荷電粒子ビームの周回と加速電圧  $8a$  の発生とタイミングを取るための可変遅延時間についての説明である。パンチモニター 9 からの通過シグナル 9a が可変遅延時間

10

20

30

40

50

発生器 15 に入力されてからゲート親信号 12 a が出力するまでの間の時間が可変遅延時間 18 である。

【0121】

この可変遅延時間 18 を制御することは、加速電圧 8 a の発生タイミングを制御することと同じである。ゲート親信号 12 a の発生から加速電圧 8 a の発生までは、常に一定時間であるためである。

【0122】

加速用の誘導電圧 8 で荷電粒子ビームを加速するためには、バンチ 3 が加速用誘導加速セル 7 に到達した時間に合わせて加速電圧 8 a を印加しなければならない。

【0123】

さらに、加速中の荷電粒子ビームは、加速時間の経過とともに、単位時間あたりに設計軌道 2 を周回する回数（周回周波数（ $f_{REV}$ ））が変化する。例えば、KEK の 12 GeV PS において陽子ビームを加速する場合、陽子ビームの周回周波数は、667 kHz から 882 kHz まで変化する。

【0124】

従って、荷電粒子ビームを意図した通りに加速するためには、加速時間とともに変化するバンチ 3 の移動時間 3 e に合わせて加速電圧 8 a を印加させ、また、バンチ 3 が加速用誘導加速セル 7 に存在しない時間帯にリセット電圧 8 b を発生させなければならない。

【0125】

また、誘導加速セルを用いたシンクロトロン 1 を含む円形加速器は広い敷地に設置させるため、円形加速器を構成する各装置間を接続する信号線のケーブルを長く引き回す必要がある。そして信号線を伝播する信号の速度は有限の値を持っている。

【0126】

従って、円形加速器の構成を改変した場合、信号が各装置を通過する時間が、改変する前と同じである保証がない。そのため、誘導加速セルを用いたシンクロトロン 1 を含む円形加速器では構成要素の改変の都度、印加時間のタイミングを設定しなおさなければならない。

【0127】

そこで、上記問題を解決するため、デジタル信号処理装置 12 を用いて、バンチモニター 9 の通過シグナル 9 a の発生から加速電圧 8 a を印加するまでの時間を調整することとした。具体的には、デジタル信号処理装置 12 の内部で、バンチモニター 9 からの通過シグナル 9 a を受けてから、ゲート親信号 12 a の発生までの可変遅延時間 18 を制御することとした。

【0128】

上述の条件下でも荷電粒子ビームが加速用誘導加速セル 7 を通過するタイミングに合わせて、加速電圧 8 a を印加しなければならない。可変遅延時間発生器 15 を使用することにより、バンチ 3 の通過に合わせて加速電圧 8 a を印加することが可能となる。

【0129】

可変遅延時間 18 である  $t$  は、バンチ 3 が設計軌道 2 のいずれかに置かれたバンチモニター 9 から、加速用誘導加速セル 7 に到達するまでの移動時間 3 e を  $t_0$ 、バンチモニター 9 からデジタル信号処理装置 12 までの通過シグナル 9 a の伝達時間 9 b を  $t_1$ 、及びデジタル信号処理装置 12 から出力されたゲート親信号 12 a を基に加速用誘導加速セル 7 で加速電圧 8 a を印加するまでに要する伝達時間 9 c を  $t_2$  とすると次式（6）で求められる。

$$t = t_0 - (t_1 + t_2) \cdots \text{式(6)}$$

【0130】

例えば、ある加速時間でのバンチ 3 の移動時間 3 e が 1 マイクロ秒であるとし、通過シグナル 9 a の伝達時間 9 b が 0.2 マイクロ秒、ゲート親信号 12 a が発生してから、加速電圧 8 a が発生するまでに要する伝達時間 9 c が 0.3 マイクロ秒であるならば、可変遅延時間 18 は、0.5 マイクロ秒となる。

10

20

30

40

50

## 【0131】

t は、加速の経過とともに変化する。荷電粒子ビームの加速に伴って  $t_0$  が加速の経過とともに変化するためである。従って、加速電圧  $8a$  を荷電粒子ビームに印加するためには、 $t$  をバンチ3の周回ごとに計算する必要がある。一方、 $t_1$  および  $t_2$  は、一端誘導加速セルを用いたシンクロトロン1を構成する各装置を設置すれば、一定の値である。

## 【0132】

$t_0$  は、荷電粒子ビームの周回周波数 ( $f_{REV}(t)$ )、及びバンチモニター9から加速用誘導加速セル7までの荷電粒子ビームが周回する設計軌道2の長さ ( $L$ ) から求めることができる。また、実測してもよい。

10

## 【0133】

ここで、 $t_0$  を荷電粒子ビームの周回周波数 ( $f_{REV}(t)$ ) から求める方法を示す。荷電粒子ビームが周回する設計軌道2の全長を  $C_0$  とすると、 $t_0$  は次式(7)によってリアルタイムで計算することができる。

$$t_0 = L / (f_{REV}(t) \cdot C_0) \text{ [秒]} \cdots \text{式(7)}$$

$f_{REV}(t)$  は次式(8)によって求められる。

## 【0134】

$$f_{REV}(t) = \gamma(t) \cdot c / C_0 \text{ [Hz]} \cdots \text{式(8)}$$

ここで、 $\gamma(t)$  は相対論的粒子速度、 $c$  は光速 ( $c = 2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]}$ ) である。 $\gamma(t)$  は次式(9)によって求められる。

20

## 【0135】

$$\gamma(t) = (1 - (1 / (\gamma(t)^2))) \text{ [無次元]} \cdots \text{式(9)}$$

ここで、 $\gamma(t)$  は相対論係数である。 $\gamma(t)$  は次式(10)によって求められる。

## 【0136】

$$\gamma(t) = 1 + T(t) / E_0 \text{ [無次元]} \cdots \text{式(10)}$$

ここで、 $T(t)$  は加速電圧  $8a$  によって与えられるエネルギーの増加分、 $E_0$  は荷電粒子の静止質量である。 $T(t)$  は次式(11)によって求められる。

## 【0137】

$$T(t) = \gamma(t) \cdot C_0 \cdot e \cdot B(t) \text{ [eV]} \cdots \text{式(11)}$$

ここで、 $e$  は荷電粒子が持つ電荷量、 $B(t)$  は加速開始開始からの磁場強度  $3a$  の増加分である。

30

## 【0138】

荷電粒子の静止質量 ( $E_0$ )、荷電粒子の電荷量 ( $e$ ) は、荷電粒子の種類によって異なる。

## 【0139】

上述の一連の可変遅延時間18である  $t$  を求める式を定義式という。可変遅延時間18をリアルタイムに求める時は、定義式をデジタル処理装置8dの可変遅延時間計算機14に格納する。

## 【0140】

従って、可変遅延時間18は、バンチモニター9から加速用誘導加速セル7の距離 ( $L$ )、荷電粒子ビームが周回する設計軌道2の長さ ( $C_0$ ) が定めれば、荷電粒子ビームの周回周波数によって、一意に定まる。さらに、荷電粒子ビームの周回周波数も、磁場励磁パターンによって、一意に定まる。

40

## 【0141】

また、荷電粒子の種類、誘導加速セルを用いたシンクロトロンの設定が定めれば、ある加速時点での必要な可変遅延時間18も一意に定まる。従って、バンチ3が、磁場励磁パターンにしたがって理想的な加速をするとすれば、予め可変遅延時間18を計算しておくこともできる。

## 【0142】

図4は加速エネルギーレベルと可変遅延時間の関係を示す図である。図4(A)は、陽

50

子ビームのエネルギーレベルと可変遅延時間 18 の出力時間の関係を示している。なお、KEK の 12 GeV PS に本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 を組み込み、誘導加速セルを用いたシンクロトロン 1 に陽子ビームを入射 19 c したときの値である。

【0143】

横軸 MeV は陽子ビームのエネルギーレベルであり、単位はメガボルトである。1 MeV は、1 電子ボルトは  $1.602 \times 10^{-13}$  ジュールに相当する。

【0144】

縦軸  $t$  ( $\mu s$ ) は、バンチ 3 がバンチモニター 9 を通過した時間を 0 として、加速用誘導加速セル 7 に発生させる加速電圧 8 a を制御するゲート信号パターン 13 a の出力タイミングの遅れ (可変遅延時間 18) であり、単位はマイクロ秒である。可変遅延時間 18 は、バンチモニター 9 からの通過シグナル 9 a を受けて、前述のようにデジタル信号処理装置 12 によって計算される。

10

【0145】

陽子ビームのエネルギーレベルは、周回速度 3 c によって一意に定まる。また、陽子ビームの周回速度 3 c は、シンクロトロン 1 の磁場励磁パターンに同期している。従って、可変遅延時間 18 は、リアルタイムで計算しなくとも、周回速度 3 c、或いは磁場励磁パターンから予め計算しておくことも可能である。

【0146】

図 4 (A) のグラフは、理想的な可変遅延時間パターン 18 a と、理想的な可変遅延時間パターン 18 a に対応する必要な可変遅延時間パターン 18 b である。

20

【0147】

理想的な可変遅延時間パターン 18 a とは、陽子ビームの周回スピードの変化に合わせて、加速電圧 8 a を印加するために、陽子ビームのバンチ 3 の周回毎に調節されたとしたならば、バンチ 3 がバンチモニター 9 を通過した時間から、デジタル信号処理装置 12 がゲート親信号 12 a を出力するまでに要する、エネルギーレベルの変化に対応した可変遅延時間 18 のことをいう。

【0148】

必要な可変遅延時間パターン 18 b とは、理想的には、荷電粒子ビームの周回ごとに、可変遅延時間 18 を制御することが望ましいが、可変遅延時間発生器 15 の可変遅延時間 18 に対応したパルス 15 a の制御精度が  $\pm 0.01 \mu s$  であること、バンチ 3 の周回ごとに可変遅延時間 18 を計算制御しなくとも、荷電粒子を損失することなく十分効率的な加速を行うことができることから、理想的な可変遅延時間パターン 18 a と同様に、加速電圧 8 a を荷電粒子ビームに印加することができる、エネルギーレベルの変化に対応した可変遅延時間 18 のことをいう。

30

【0149】

従って、可変遅延時間 18 は、一定時間の時間単位で制御することとなる。この単位のことを、制御時間単位 18 c という。ここでは、 $0.1 \mu s$  である。

【0150】

図 4 (A) のグラフから、エネルギーレベルの低い入射 19 c の直後の陽子ビームは、KEK の 12 GeV PS での加速においては、約  $1.0 \mu s$  の長さの可変遅延時間 18 を必要とする。さらに、陽子ビームは加速時間とともに、エネルギーレベルが増加し、それに伴って、可変遅延時間 18 も短くなる。特に、約 4500 MeV 以上から加速終了の付近では、可変遅延時間 18 はほぼ 0 に近くなる。

40

【0151】

図 4 (B) は加速時間とともに、デジタル信号処理装置 12 で計算され、出力されるゲート親信号 12 a の可変遅延時間 18 が短くなっている様子を示している。横軸  $t$  ( $\mu s$ ) は可変遅延時間 18 であり、単位はマイクロ秒である。図 4 (A) の縦軸に対応する。

【0152】

例えば、入射 19 c の直後に  $1 \mu s$  の可変遅延時間 18 を要する陽子ビームは、2000 MeV 付近のエネルギーレベルの時間帯では、 $0.2 \mu s$  の可変遅延時間 18 でよい。

50

## 【0153】

バンチモニター9より得られる通過シグナル9aを基に、デジタル信号処理装置12によって、ゲート親信号12aの可変遅延時間18を制御することで、入射19cの直後の低いエネルギーレベルから、加速後半の高いエネルギーレベルまで、バンチ3の周回周波数に合わせて得て加速電圧8aを印加することが可能であることを意味する。

## 【0154】

従って、誘導加速セルを用いたシンクロトロン1において、本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置6を用いることで、任意の荷電粒子の周回周波数に対しても、可変遅延時間計算機14の磁場励磁パターンから計算される等価的な加速電圧値パターン8dを、選択した荷電粒子に対応した磁場励磁パターンに書き換えること、又は磁場励磁パターンから計算される理想的な可変遅延時間パターン18aに対応した必要な可変遅延時間パターン18bに書き換えることで、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルに加速することができることとなる。

10

## 【0155】

図5は、遅い繰り返しと理想的な加速電圧値、及び等価的な加速電圧値の関係を示す図である。なお、図5はKEKの12GeVPSによる陽子ビームを加速する場合の磁場励磁パターン19である。

## 【0156】

横軸tは誘導加速セルを用いたシンクロトロン1に荷電粒子ビームが入射19cされた時間を基準にした運転時間である。第1縦軸Bは誘導加速セルを用いたシンクロトロン1を構成する偏向電磁石4の磁場強度3aである。第2縦軸vは加速電圧値8iである。

20

## 【0157】

遅い繰り返しとは、荷電粒子が前段加速器から入射19cされた時間を基準に、加速を経て、出射し、さらに次の入射19cができるまでの時間である1周期が約数秒程度の遅い繰り返しのシンクロトロン1の磁場励磁パターン19による加速のことをいう。

## 【0158】

この磁場励磁パターン19は、荷電粒子ビームが入射19cされた直後から、磁場強度3aを徐々に高め、出射の時点で最大磁場励磁状態になる。特に、荷電粒子ビームの入射19cの直後から、磁場強度3aは指数関数的に増加する。この時間帯の磁場励磁パターン19を非線形励磁領域19aという。その後、加速終了までは、一次関数的な増加になる。この時間帯の磁場励磁パターン19を線形励磁領域19bという。

30

## 【0159】

従って、荷電粒子ビームを誘導加速セルを用いたシンクロトロン1によって加速するためには、この磁場励磁パターン19に同期して、加速電圧8aを発生させることが必要である。そのときのシンクロトロン1の磁場励磁パターン19に同期する理想的な加速電圧値(Vacc)は、次式(12)に示す関係がある。

$$V_{acc} = dB/dt \cdots \text{式(12)}$$

すなわち、ある時間での必要な加速電圧値8iは、当該時間での磁場励磁パターン19の時間変化率と比例関係にある。

## 【0160】

よって、非線形励磁領域19aでは、磁場強度3aが二次関数的に増加していることから、必要となる誘導電圧値は、加速時間の時間変化の一次に比例して変化することとなる。

40

## 【0161】

一方、線形励磁領域19bでの理想的な加速電圧値8kは、加速時間の変化に関係なく一定である。先の非特許文献2の内容は、この線形励磁領域19bにおいて、一定電圧値の加速電圧8aを一定間隔で印加するによって、陽子が加速できることを実証したものである。また、加速電圧8aは上述したように、印加し続けることはできないので、加速電圧8aを印加した次回は、リセット電圧8bが必要である。

## 【0162】

50

従って、加速電圧 8 a をこの非線形励磁領域 19 a の磁場励磁パターン 19 に同期するためには、加速電圧値 8 j を時間変化とともに増加させることが必要である。

【0163】

しかし、加速用誘導加速セル 7 自体は、誘導電圧調整機構をもっていないため加速電圧値 8 i は、一定の値でしか得られない。一方、加速用誘導加速セル 7 で発生させるバンクコンデンサー 24 の充電電圧を制御することにより加速電圧値 8 i を変化することも考えられるが、バンクコンデンサー 24 は本来、出力変動に伴う充電電圧の変動を制御する目的で装荷されているものであるため、現実的にはバンクコンデンサー 24 の充電電圧を変化させる方法は、加速電圧値 8 i を速やかに制御する目的には使用できない。

【0164】

そこで、図 6 に示すパルス密度を採用し、荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 を用いて、加速電圧 8 a の発生タイミングを非線形励磁領域 19 a の磁場励磁パターン 19 に同期させることとした。

【0165】

制御単位における加速電圧 8 a の印加回数を 0 から、バンチ 3 の周回毎に印加するように、段階的に増加させることで、理想的な加速電圧値パターン 8 c と制御単位においては、等価な加速電圧値 8 i を与えることができる。この等価な加速電圧値 8 i の集まりを等価的な加速電圧値パターン 8 d という。

【0166】

例えば、4.7 kV の加速電圧 8 a の制御単位が 10 周回と設定すると、加速電圧値 8 i は 0 kV から 4.7 kV まで、0.47 kV 間隔で段階的に、加速電圧値 8 i を調整することができる。その結果、非線形励磁領域 19 a での等価的な加速電圧値パターン 8 d は 10 段階の加速電圧値 8 i に分割できることとなる。

【0167】

さらに小さい加速電圧値 8 i が要求される場合には、バンチ 3 の周回数に対する加速電圧 8 a の印加回数の比を調整すればよい。例えば、加速電圧値 8 i として 0.093 kV を必要とする場合は、バンチ 3 の 100 周回毎に 2 回加速電圧 8 a を印加すればよい。

【0168】

非線形励磁領域 19 a が 0.1 秒間あるとすると、制御単位を 10 と設定した場合の各段階の時間は、0.01 秒となる。

【0169】

パルス密度変化によって加速電圧 8 a の発生タイミングで制御することで、一定値の加速電圧 8 a でも、理想的な加速電圧値パターン 8 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 8 d によって、一定時間 19 d では、理想的な加速電圧値パターン 8 c を与えたことになる。

【0170】

なお、大きく変化するシンクロトロン 1 の磁場励磁パターン 19 に同期させ、荷電粒子ビームを加速するためには、まず、前提として線形励磁領域 19 b で必要な加速電圧値 9 k を印加できる加速用誘導加速セル 7 によって、陽子ビームのバンチ 3 の周回毎に一定電圧値である加速電圧 8 a を印加することが必要である。

【0171】

図 6 はパルス密度変化による加速電圧値の制御方法を示した図である。記号 t および v の意味は、図 5 と同じである。

【0172】

図 6 に示す加速用の誘導電圧 8 の発生タイミング群をパルス密度 20 という。このようなパルス密度 20 をある周回数ごとにまとめて制御するバンチ 3 の周回数を、ここでは、制御単位 21 という。

【0173】

t 1 は非線形励磁領域 19 a の制御単位 21 が 10 数回であるときの制御単位 21 に要する時間を意味する。t 2 は線形励磁領域 19 b の制御単位 21 が 10 数回であるときの

10

20

30

40

50

制御単位 2 1 に要する時間を意味する。

【 0 1 7 4 】

パルス密度 2 0 は、等価的な加速電圧値パターン 8 d として、上述したように、加速電圧演算機 1 6 に予め与えることも、加速電圧演算機 1 6 でリアルタイム計算することができる。

【 0 1 7 5 】

$v_1$  は、 $t_1$  の間にパンチ 3 に印加された平均的な加速電圧値 8 h である。 $v_1$  の値は、 $t_1$  の間、すなわちパンチ 3 が 1 0 回、加速用誘導加速セル 7 を通過する時間の内の 7 回の通過に対して、一定電圧値  $v_0$  の加速電圧 8 a を印加したとき、 $v_1 = 7 / 10 \cdot v_0 = 0.7 v_0$  として計算できる。

10

【 0 1 7 6 】

点線で示した加速電圧 8 f は、パンチ 3 が加速用誘導加速セル 7 に到達しても、加速電圧 8 a を印加されないことを意味する。同様に点線で示したりセット電圧 8 g も印加されないことを意味する。

【 0 1 7 7 】

このようにパルス密度 2 0 を荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 で制御することで、一定電圧値の加速電圧 8 a のみしか印加できない加速用誘導加速セル 7 によっても、理想的な加速電圧値パターン 8 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 8 d を与えることで、大きく変動する非線形励磁領域 1 9 a の磁場励磁パターン 1 9 に同期することが可能になった。

20

【 0 1 7 8 】

当然に、線形励磁領域 1 9 b で要求される一定値である理想的な加速電圧値 8 k にも同期することが可能である。その場合の、平均的な加速電圧値 8 h である  $v_2$  は、加速用誘導加速セル 7 を通過するパンチ 3 に対して、毎周回、一定電圧  $v_0$  の加速電圧 8 a を印加する。すなわち  $v_2 = 10 / 10 \cdot v_0 = v_0$  である。

【 0 1 7 9 】

従って、前記制御単位 2 1 に荷電粒子ビームに印加された加速電圧値 ( $V_{ave}$ ) は、加速用誘導加速セル 7 によって印加される一定値の加速電圧値 ( $V_0$ )、及び前記制御単位 2 1 の加速電圧 8 a の印加回数 ( $N_{on}$ ) と停止した加速電圧 8 f の回数 ( $N_{off}$ ) から、次式 ( 1 3 ) によって計算できる。

30

$$V_{ave} = V_0 \cdot N_{on} / (N_{on} + N_{off}) \cdots \text{式 ( 1 3 )}$$

【 0 1 8 0 】

なお、連続して印加する加速電圧 8 a と加速電圧 8 a を印加する時間 ( 以下、パルス間隔 2 0 a という。 ) を徐々に短くすることで、パンチ 3 の周回時間の短縮に対応することができる。

【 0 1 8 1 】

図 7 は加速電圧発生の停止による荷電粒子ビームの軌道制御方法を示す図である。図 7 は図 5 における線形励磁領域 1 9 b の制御単位 2 1 ( 1 0 周回 ) に実際に印加された加速電圧 8 a のパルス密度 2 0 b である。横軸 T は荷電粒子ビームの周回数を示す。縦軸 v は加速電圧値 8 i である。

40

【 0 1 8 2 】

線形励磁領域 1 9 b での理想的な加速電圧値 8 k は、時間変化に関係なく一定である。従って、理想的な加速電圧値 8 k を印加できる加速用誘導加速セル 7 によって、パンチ 3 の周回毎に一定電圧値である加速電圧 8 a を印加すればよいこととなる。

【 0 1 8 3 】

しかし、例えば、式 ( 1 2 ) により計算される線形励磁領域 1 9 b での理想的な加速電圧値 8 k が時間変化に関係なく一定であったとしても、一定電圧の加速電圧値 8 i を印加することはできない。

【 0 1 8 4 】

印加する実際の加速電圧値 8 i は、ある程度の幅で高くなったり、低くなったり加速電

50

圧の設定値 8 e からズれる。これは、バンクコンデンサー 2 4 の充電電圧が理想値からズれることに由来する。

【0185】

従って、加速電圧演算機 1 6 に予め計算した等価的な加速電圧値パターン 8 d を格納し、等価的な加速電圧値パターン 8 d に基づく、パルス密度 2 0 b により加速電圧 8 a を印加したとしても、いずれ荷電粒子ビームは設計軌道 2 からズれることとなる。

【0186】

例えば、実際に印加した加速電圧値 8 i が、理想的な加速電圧値 8 k (一定時間 1 9 d における等価的な加速電圧値) より低い場合には、荷電粒子ビームは、設計軌道 2 より内側 2 b の軌道を周回し、いずれ偏向電磁石 4 の磁場励磁パターン 1 9 と同期することができず、真空ダクト壁面に衝突し、消失してしまう。

10

【0187】

一方、実際に印加した加速電圧値 8 i が、理想的な加速電圧値 8 k (一定時間 1 9 d における等価的な加速電圧値) より高い場合には、荷電粒子ビームは、設計軌道 2 より外側 2 c の軌道を周回し、いずれ偏向電磁石 4 の磁場励磁パターン 1 9 と同期することができず、真空ダクト壁面に衝突して、同じく消失してしまう。

【0188】

そこで、誘導加速セルを用いたシンクロトロン 1 で、荷電粒子ビームの損失を低減し、効率的な加速を繰り返すために、予め計算した等価的な加速電圧値パターン 8 d に基づくパルス密度 2 0 を修正することで、荷電粒子ビームを設計軌道 2 に維持することを可能にした。

20

【0189】

パルス密度 2 0 の修正は、第 1 に制御単位 2 1 当たり、予め計算した等価的な加速電圧値パターン 8 d に対して、過剰分に相当する点線で示した加速電圧 8 l の発生を停止することによって可能である。

【0190】

具体的には、加速電圧演算機 1 6 が、位置モニター 1 1 から、荷電粒子ビームがどれだけ外側 2 c にズれているかの情報である位置シグナル 1 1 a を受けて、予め加速電圧演算機 1 6 に格納された等価的な加速電圧値パターン 8 d に基づくパルス密度 2 0 の過剰分の加速電圧値に相当するパルス 1 6 a の発生を停止する方法である。

30

【0191】

他に、上述した、等価的な加速電圧値パターン 8 d のある時間の制御単位 2 1 のパルス密度 2 0 を、加速電圧演算機 1 6 に格納した別のパルス密度 2 0 に置換することでも荷電粒子ビームの軌道を設計軌道 2 に維持することができる。

【0192】

また、リアルタイムで、可変遅延時間 1 8、加速電圧 8 a のオンおよびオフを制御する場合には、パンチ 3 の周回毎に加速電圧 8 a を制御することにより、結果的に荷電粒子ビームの軌道は設計軌道 2 に位置することができる。

【0193】

なお、非線形励磁領域 1 9 a においても、線形励磁領域 1 9 b と同様に荷電粒子ビームの軌道制御が必要であるが、ビーム偏向磁場強度シグナル 4 b の値から、式 ( 1 ) によって加速用の誘導電圧 8 の値が自動的に計算される。

40

【0194】

従って、外側 2 c にズれた荷電粒子ビームは、過剰分に相当する加速電圧 8 l の発生を停止することで、設計軌道 2 に維持させることが可能であるから、加速電圧の設定値 8 e は、理想的な加速電圧値パターン 8 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 8 d より、高い加速電圧値 8 i を得られるように設定することが望ましい。

【0195】

その結果、実際の加速電圧値 8 i は、理想的な加速電圧値パターン 8 c より大きくなる。そこで、磁場励磁パターン 1 9 に同期させるためには、一定の制御単位 2 1 において、

50

加速電圧 8 a の発生を上述した方法により停止し、パルス密度 2 0 を修正すればよい。

【0196】

本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 を用いて、上述のように制御単位 2 1 のパルス密度 2 0 を修正することによって、ほぼ一定の電圧値 ( $V_0$ ) の加速電圧 8 a しか印加することができない加速用誘導加速セル 7 であっても、遅い繰り返しのシンクロトロン 1 の磁場励磁パターン 1 9 に同期して、加速電圧 8 a を陽子ビームに印加することが可能である。

【0197】

さらに、過剰な加速電圧値を受け、設計軌道 2 から外側 2 c にズレた荷電粒子ビームは、本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 により、リアルタイムでパルス密度を修正することで、外側 2 c にズレた荷電粒子ビームを、基の設計軌道 2 に位置させることができることとなった。

10

【0198】

また、この荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 及びその制御方法によれば、速い繰り返しのシンクロトロン 1 の磁場励磁パターンであっても、制御単位 2 1 当たりのパルス密度 2 0 を修正して、一定電圧値の加速電圧 8 a を印加することで、速い繰り返しのシンクロトロン 1 の磁場励磁パターンに同期して、加速電圧 8 a を荷電粒子ビームに印加することが可能となる。

【0199】

さらに、外側 2 c にズレた荷電粒子ビームの軌道を基の設計軌道 2 に位置させることも

20

【0200】

速い繰り返しとは、荷電粒子ビームを前段加速器からの入射から開始し、加速を経て、出射し、さらに次の入射ができるまでの時間である 1 周期が約数十ミリ秒程度の速い繰り返しのシンクロトロン 1 の磁場励磁パターンによる加速のことをいう。

【0201】

速い繰り返しの磁場励磁パターンに同期させるためには、遅い繰り返しのシンクロトロン 1 の磁場励磁パターン 1 9 に比べ、要求される理想的な加速電圧値パターンは時間とともに著しく増減する。

【0202】

しかし、本発明による荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 及びその制御方法を用いることで、荷電粒子ビームの軌道を基の設計軌道 2 に位置させることができる。

30

【0203】

従って、本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 及びその制御方法を用いて、可変遅延時間 1 8、誘導電圧のパルス密度 2 0 を制御することで、あらゆる磁場励磁パターンに対しても、荷電粒子ビームが設計軌道 2 を外れることなく、設計軌道 2 に維持させることが可能になった。

【産業上の利用可能性】

【0204】

本発明である荷電粒子ビームの軌道制御装置 6 及びその制御方法は、上記効果が得られることから、従来のサイクロトロン、高周波シンクロトロンでは不可能であった重い荷電粒子を含む任意の荷電粒子を、任意のエネルギーレベルまで効率的に加速することができることとなる。特に、医療分野、物理分野において、自動で荷電粒子ビームの軌道維持を行う運転が容易な円形加速器として幅広い応用が期待できる。

40

【図面の簡単な説明】

【0205】

【図 1】本発明を含む誘導加速セルを用いたシンクロトロンの概略図である。

【図 2】デジタル信号処理装置の構成図である。

【図 3】可変遅延時間の説明図である。

【図 4】加速エネルギーレベルと可変遅延時間との関係を示す図である。

50

【図5】理想的な加速電圧値と等価的な加速電圧値の説明図である。

【図6】パルス密度変化による加速電圧の制御方法を示す図である。

【図7】加速電圧発生 of 停止による荷電粒子ビームの軌道制御方法を示す図である。

【図8】誘導電圧による加速の原理を示す図である。

【図9】加速用誘導加速装置の等価回路である。

【図10】荷電粒子ビームの軌道と磁場による水平方向の閉じ込めの様子を示す図である。

【符号の説明】

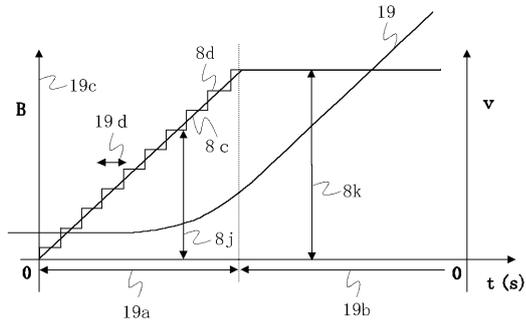
【0206】

1	シンクロトロン	10
2	設計軌道	
2 a	真空ダクト中心	
2 b	内側	
2 c	外側	
2 d	平均半径	
3	バンチ	
3 a	磁場強度	
3 b	遠心力	
3 c	周回速度	
3 d	進行軸方向	20
3 e	移動時間	
4	偏向電磁石	
4 a	サイクルシグナル	
4 b	ビーム偏向磁場強度シグナル	
5	加速用誘導加速装置	
5 a	スイッチング電源	
5 b	DC充電器	
5 c	パルス電圧	
6	軌道制御装置	
7	加速用誘導加速セル	30
7 a	加速ギャップ	
8	加速用の誘導電圧	
8 a	加速電圧	
8 b	リセット電圧	
8 c	理想的な加速電圧値パターン	
8 d	等価的な加速電圧値パターン	
8 e	加速電圧の設定値	
8 f	加速電圧	
8 g	リセット電圧	
8 h	平均的な加速電圧値	40
8 i	加速電圧値	
8 j	加速電圧値	
8 k	加速電圧値	
8 l	加速電圧	
9	バンチモニター	
9 a	通過シグナル	
9 b	伝達時間	
9 c	伝達時間	
10	速度モニター	
10 a	速度シグナル	50

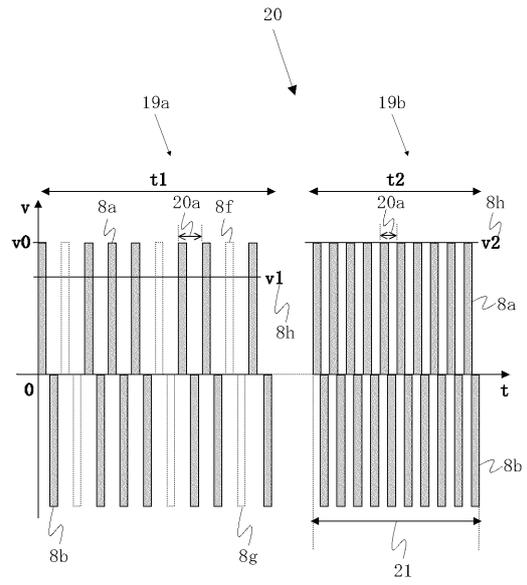
1 1	位置モニター	
1 1 a	位置シグナル	
1 2	デジタル信号処理装置	
1 2 a	ゲート親信号	
1 3	パターン生成器	
1 3 a	ゲート信号パターン	
1 4	可変遅延時間計算機	
1 4 a	可変遅延時間シグナル	
1 5	可変遅延時間発生器	
1 5 a	パルス	10
1 6	加速電圧演算機	
1 6 a	パルス	
1 7	ゲート親信号出力器	
1 8	可変遅延時間	
1 8 a	理想的な可変遅延時間パターン	
1 8 b	必要な可変遅延時間パターン	
1 8 c	制限時間単位	
1 9	磁場励磁パターン	
1 9 a	非線形励磁領域	
1 9 b	線形励磁領域	20
1 9 c	入射	
1 9 d	一定時間	
2 0	パルス密度	
2 0 a	パルス間隔	
2 0 b	パルス密度	
2 1	制御単位	
2 2	バリアー電圧	
2 2 a	負のバリアー電圧	
2 2 b	正のバリアー電圧	
2 3	加速用誘導加速装置の等価回路	30
2 4	バンクコンデンサー	
2 4 a	第 1 スイッチ	
2 4 b	第 2 スイッチ	
2 4 c	第 3 スイッチ	
2 4 d	第 4 スイッチ	
2 5	マッチング抵抗	
2 6	誘導電圧モニター	
2 6 a	誘導電圧シグナル	



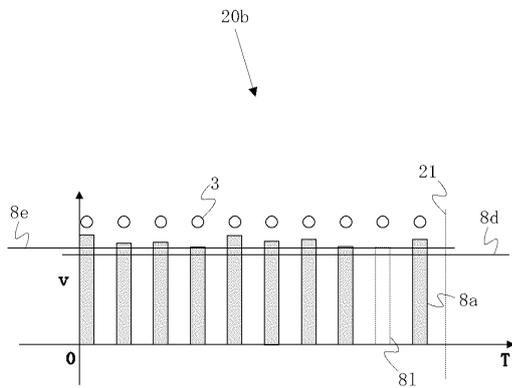
【 図 5 】



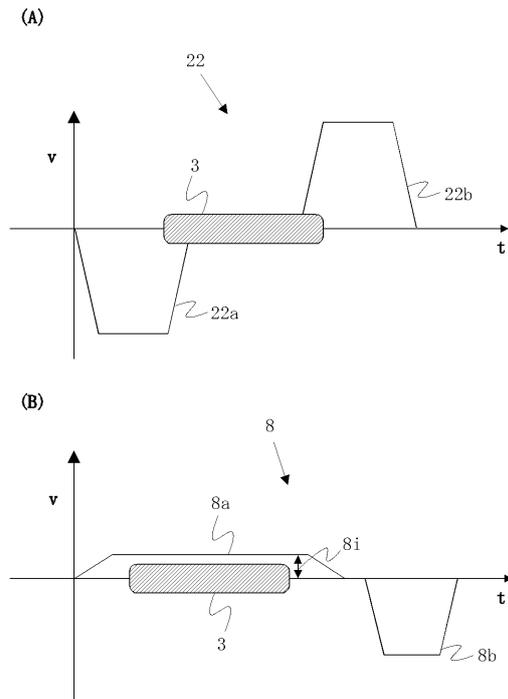
【 図 6 】



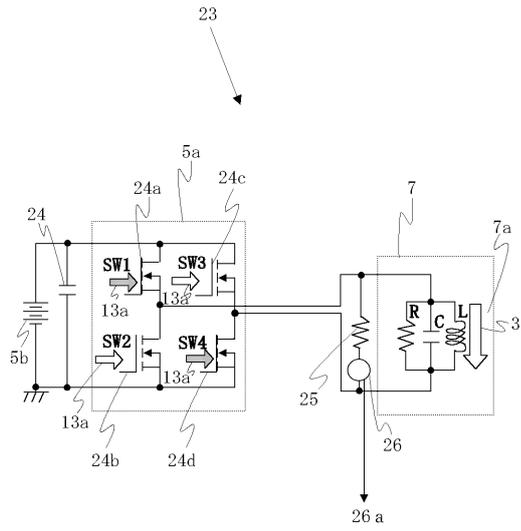
【 図 7 】



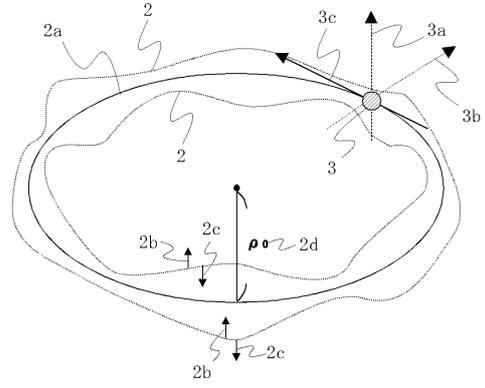
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 木代 純逸

茨城県つくば市大穂 1 - 1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

(72)発明者 荒木田 是夫

茨城県つくば市大穂 1 - 1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

Fターム(参考) 2G085 AA13 BA04 BA19 BC15 CA05 CA20 CA24 CA26

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載  
 【部門区分】第7部門第1区分  
 【発行日】平成20年3月27日(2008.3.27)

【公開番号】特開2007-18849(P2007-18849A)  
 【公開日】平成19年1月25日(2007.1.25)  
 【年通号数】公開・登録公報2007-003  
 【出願番号】特願2005-198557(P2005-198557)  
 【国際特許分類】

H 0 5 H 13/04 (2006.01)

【 F I 】

H 0 5 H 13/04 M

H 0 5 H 13/04 N

【手続補正書】

【提出日】平成20年2月13日(2008.2.13)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、前記シンクロトロンの設計軌道にある荷電粒子ビームの設計軌道からのズレを感知する位置モニターからの位置シグナル、及びバンチの通過を感知するバンチモニターからの通過シグナルを受けて、誘導電圧の発生タイミングを制御するデジタル信号処理装置と、前記デジタル信号処理装置で生成されたゲート親信号を基に誘導加速セルを駆動するスイッチング電源のオンおよびオフ制御するゲート信号パターンを生成するパターン生成器からなることを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御装置。

【請求項2】

前記デジタル信号処理装置が、磁場励磁パターンを基に計算される理想的な可変遅延時間パターンに対応する必要な可変遅延時間パターンを格納し、前記必要な可変遅延時間パターンに基づき可変遅延時間シグナルを生成する可変遅延時間計算機と、荷電粒子ビームが周回する設計軌道にあるバンチモニターからのバンチの通過シグナル、前記可変遅延時間計算機からの可変遅延時間シグナルを受けて、可変遅延時間に相当するパルスを生成する可変遅延時間発生器と、磁場励磁パターンを基に計算される理想的な加速電圧値パターンに対応する等価的な加速電圧値パターンを格納し、前記可変遅延時間発生器からの可変遅延時間に相当するパルス、及び設計軌道にある荷電粒子ビームの設計軌道からのズレを感知する位置モニターからの位置シグナルを受けて、加速用の誘導電圧のオンオフを制御するパルスを生成する加速電圧演算機、及び前記加速電圧演算機からのパルスを受けて、パターン生成器に適したパルスであるゲート親信号を生成するゲート親信号出力器からなることを特徴とする請求項1記載の荷電粒子ビームの軌道制御装置。

【請求項3】

誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、可変遅延時間シグナルを生成する可変遅延時間計算機と、荷電粒子ビームが周回する設計軌道にあるバンチモニターからのバンチの通過シグナル、前記可変遅延時間計算機からの可変遅延時間シグナルを受けて、可変遅延時間に相当するパルスを生成する可変遅延時間発生器と、前記可変遅延時間発生器からの可変遅延時間に相当するパルス、及び設計軌道にある荷電粒子ビームの設計軌道からのズレを感知する位置モニターからの位置シグナルを受けて、加速用の誘導電圧のオンオ

フを制御するパルスを生成する加速電圧演算機と、前記加速電圧演算機からのパルスを受けて、パターン生成器に適したパルスであるゲート親信号を生成するゲート親信号出力器からなるデジタル信号処理装置、及び前記ゲート親信号を誘導加速セルを駆動するスイッチング電源のゲート信号パターンへと変換するパターン生成器により、制御単位のパルス密度を制御することを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御方法。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0046

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0046】

誘導加速セルを用いたシンクロトロン1において、磁場励磁パターン19を基に計算される理想的な可変遅延時間パターン18aに対応する必要な可変遅延時間パターン18bを格納し、前記必要な可変遅延時間パターン18bに基づき可変遅延時間18に相当する可変遅延時間シグナル14aを生成する可変遅延時間計算機14と、バンチ3が周回する設計軌道2にあるバンチモニター9からのバンチ3の通過シグナル9a、前記可変遅延時間計算機14からの可変遅延時間シグナル14aを受けて、可変遅延時間18に相当するパルス15aを生成する可変遅延時間発生器15と、磁場励磁パターン19を基に計算される理想的な加速電圧値パターン8cに対応する等価的な加速電圧値パターン8dを格納し、前記可変遅延時間発生器15からの可変遅延時間18に相当するパルス15a、及び設計軌道2にある荷電粒子ビームの設計軌道2からのズレを感知する位置モニター11からの位置シグナル11aを受けて、加速用の誘導電圧8のオンオフを制御するパルス16aを生成する加速電圧演算機16と、及び前記加速電圧演算機16からのパルス16aを受けて、パターン生成器13に適したパルスであるゲート親信号12aを生成するゲート親信号出力器17からなるデジタル信号処理装置12、及び前記デジタル信号処理装置12で生成されたゲート親信号12aを基に誘導加速セルを駆動するスイッチング電源5aのオンおよびオフ制御するゲート信号パターン13aを生成するパターン生成器13からなることを特徴とする荷電粒子ビームの軌道制御装置6の構成とした。