

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4399604号
(P4399604)

(45) 発行日 平成22年1月20日(2010.1.20)

(24) 登録日 平成21年11月6日(2009.11.6)

(51) Int.Cl. F I
H05H 13/04 (2006.01) H05H 13/04 M
 H05H 13/04 N

請求項の数 3 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2005-198557 (P2005-198557)	(73) 特許権者	504151365
(22) 出願日	平成17年7月7日(2005.7.7)		大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
(65) 公開番号	特開2007-18849 (P2007-18849A)		茨城県つくば市大穂1番地1
(43) 公開日	平成19年1月25日(2007.1.25)	(74) 代理人	100093816
審査請求日	平成17年8月23日(2005.8.23)		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) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

1次側電気回路にスイッチング電源からパルス電圧を受けて、2次側絶縁部に誘導され、荷電粒子ビームに印加される誘導電圧を生成する誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて用いられる荷電粒子ビームの軌道制御装置であって、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を受け予め格納された制御単位中のパルス密度を必要に応じ過剰な加速電圧値を減じる修正又は予め与えられた軌道修正用のパルス密度を選択する修正をし、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ゲート親信号を生成するデジタル信号処理装置と、前記ゲート親信号を基に前記誘導加速セルを駆動するスイッチング電源のオンオフを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とからなり、前記ゲート信号パターンにより、スイッチング電源のオンオフを制御し、前記誘導電圧の発生タイミングを制御単位のパルス密度に基づき荷電粒子ビームの周回毎に制御す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、荷電粒子ビームの周回軌道を維持する荷電粒子ビームの加速に伴い変動する偏向磁石の磁場強度の変化パターンである磁場励磁パターンを基に計算される誘導加速セルを通過する荷電粒子ビームと誘導電圧の発生タイミングとを合わせるため、下記式(6)で求めら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荷電粒子ビームの加速段階で変化する加速に必要な誘導電圧の電圧値の変化パターンである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誘導加速セルを通過する荷電粒子ビームと誘導電圧の発生タイミングとを合わせるため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、荷電粒子ビームの周回毎に磁場励磁パターンに同期するために必要な誘導電圧値の過不足を計算し、必要に応じ予め格納されたパルス密度から過剰な誘導電圧分に相当する誘導電圧の発生を停止又は不足する誘導電圧分に相当する誘導電圧を発生させる修正をし、加速用の誘導電圧のオンオフを制御するパルス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。

10

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

t : 可変遅延時間

t₀ : バンチモニターから誘導加速セルに到達するまでのバンチの移動時間

t₁ : バンチモニターからデジタル信号処理装置までの通過シグナルの伝達時間

20

t₂ : デジタル信号処理装置から出力されたゲート親信号を基に誘導加速セルで誘導電圧を印加するまでに要する時間

【請求項3】

1次側電気回路にスイッチング電源からパルス電圧を受けて、2次側絶縁部に誘導され、荷電粒子ビームに印加される誘導電圧を生成する誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、

誘導加速セルを通過する荷電粒子ビームと誘導電圧の発生タイミングとを合わせるため、下記式(6)で求められる可変時間に相当する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誘導加速セルを通過する荷電粒子ビームと誘導電圧の発生タイミングとを合わせるため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予め格納されたパルス密度を必要に応じ過剰な加速電圧値を減じる修正又は予め与えられた軌道修正用のパルス密度を選択する修正をし、加速用の前記誘導電圧のオンオフを制御するパルス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前記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、

30

40

前記誘導電圧の発生タイミングを制御単位のパルス密度に基づき荷電粒子ビームの周回毎に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。

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

t : 可変遅延時間

t₀ : バンチモニターから誘導加速セルに到達するまでのバンチの移動時間

t₁ : バンチモニターからデジタル信号処理装置までの通過シグナルの伝達時間

t₂ : デジタル信号処理装置から出力されたゲート親信号を基に誘導加速セルで誘導電圧を印加するまでに要する時間

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

50

【 0 0 0 1 】

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。

【 0 0 0 2 】

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】

【 0 0 0 3 】

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。

【 0 0 0 4 】

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。

【 0 0 0 5 】

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。

【 0 0 0 6 】

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。

【 0 0 0 7 】

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 2 2 という。

【 0 0 0 8 】

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 2 2 a 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 2 2 b 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。

【 0 0 0 9 】

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。

【 0 0 1 0 】

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 8 a といい、その電圧値を加速電圧値 8 i という。

【 0 0 1 1 】

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 8 a と異極の加速用の誘導電圧 8 をリセット電圧 8 b という。このリセット電圧 8 b 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。

【 0 0 1 2 】

10

20

30

40

50

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パンチ 3（スーパーパンチ）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。

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

10

【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。

20

【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。

【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】

30

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パンチ 3 が感じる加速用の誘導電圧 8 である。

【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、バンクコンデンサー 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 にパンチ 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。

40

【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。

【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

50

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。

【 0 0 2 2 】

前記、ゲート信号パターン 1 3 a は、スイッチング電源 5 a の駆動を制御する信号であり、バンチ 3 の通過シグナル 9 a を基に、デジタル信号処理装置 1 2、及びパターン生成器 1 3 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。

【 0 0 2 3 】

なお、バンチ 3 に印加された加速電圧 8 a は、回路中の電流値とマッチング抵抗 2 5 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 2 6 など電流値を測定することで印加した加速電圧 8 a の値を知ることができる。

【 0 0 2 4 】

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、12 GeV PS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 8 0 億電子ボルトまで加速することに成功している。

【 0 0 2 5 】

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 1.602×10^{-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】

【 0 0 2 6 】

図 1 0 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 3 a によって、バンチ 3 を設計軌道 2 上に維持している。

【 0 0 2 7 】

偏向電磁石による磁場強度 3 a がなければ、バンチ 3 は、荷電粒子ビームがもつ遠心力 3 b 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 3 a 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。

【 0 0 2 8 】

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。

【 0 0 2 9 】

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 2 a 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 2 a 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 2 a までの平均半径 2 d である。

【 0 0 3 0 】

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 3 a 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 3 b 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 8 a を荷電粒子ビームに印加することをいう。

【 0 0 3 1 】

しかし、バンチ 3 の周回毎に印加する加速電圧値 8 i 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 2 4 の充電電圧が理想値からズレることなど種々の要因に由来する。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 2 】

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 $8 i$ より、実際に印加された加速電圧値 $8 i$ 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 2 b にズれることとなる。一方、理想的な加速電圧値 $8 i$ より、実際に印加した加速電圧値 $8 i$ 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 2 c にズれる。

【 0 0 3 3 】

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。

【 0 0 3 4 】

しかし、閉込用誘導加速セルにおいては、バリアー電圧 2 2 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 2 c にズれたバンチ 3 を、すなわち磁場励磁パターンに同期できなくなったバンチ 3 を設計軌道 2 に戻すことはできない。

【 0 0 3 5 】

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 よりズれたバンチ 3 を局所的に補正するものである。

【 0 0 3 6 】

上述のように、磁場強度 3 a では、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 と磁場励磁パターンとを一致させることができない。従って、荷電粒子エネルギーが設計値から外れたバンチ 3 をステアリング磁石を用いて設計軌道 2 に修正することはできない。

【 0 0 3 7 】

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。

【 0 0 3 8 】

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。

【 0 0 3 9 】

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。

【 0 0 4 0 】

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。

【 0 0 4 1 】

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。

【 0 0 4 2 】

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。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 3 】

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。

【 0 0 4 4 】

上述した印加させる加速電圧値 $8i$ 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 $8i$ よりも高い、加速電圧値 $8i$ 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 $3b$ によって、設計軌道 2 の外側 $2c$ 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。

【 0 0 4 5 】

そこで、本発明は上記問題を解決するため、理想的な加速電圧値 $8i$ に対し荷電粒子ビームの所定周回数の中で、理想的な加速電圧値 $8i$ と等価的な加速電圧値 $8i$ 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 $8i$ と等価な加速電圧値 $8i$ を発生する、制御単位中の加速電圧の発生頻度（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 $8a$ 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を目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 4 6 】

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。

【発明の効果】

【 0 0 4 7 】

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。

【 0 0 4 8 】

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。

【 0 0 4 9 】

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。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 0 】

加えて、荷電粒子ビームを、設計軌道 2 に対して、内側 2 b、又は外側 2 c 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 】

【 0 0 5 1 】

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 1 9 を基に計算される理想的な可変遅延時間パターン 1 8 a に対応する必要な可変遅延時間パターン 1 8 b を格納し、前記必要な可変遅延時間パターン 1 8 b に基づき可変遅延時間 1 8 に相当する可変遅延時間シグナル 1 4 a を生成する可変遅延時間計算機 1 4 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 9 a、前記可変遅延時間計算機 1 4 からの可変遅延時間シグナル 1 4 a を受けて、可変遅延時間 1 8 に相当するパルス 1 5 a を生成する可変遅延時間発生器 1 5 と、磁場励磁パターン 1 9 を基に計算される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 を格納し、前記可変遅延時間発生器 1 5 からの可変遅延時間 1 8 に相当するパルス 1 5 a、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 1 1 からの位置シグナル 1 1 a 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 1 6 a を生成する加速電圧演算機 1 6 と、前記加速電圧演算機 1 6 からのパルス 1 6 a を受けて、パターン生成器 1 3 に適したパルスであるゲート親信号 1 2 a を生成するゲート親信号出力器 1 7 からなるデジタル信号処理装置 1 2、及び前記ゲート親信号 1 2 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であるゲート信号パターン 1 3 a へと変換するパターン生成器 1 3 により、制御単位 2 1 のパルス密度 2 0 から過剰な加速電圧 8 a 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 】

【 0 0 5 2 】

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。

【 0 0 5 3 】

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 2 2 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 1 0、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 2 b、または外側 2 c にズレているかを検出する位置モニター 1 1 などからなる。

【 0 0 5 4 】

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 3 a を発生させる。偏向電磁石 4 に発生している磁場強度 3 a 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 3 a を求めることができる。

【 0 0 5 5 】

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。

【 0 0 5 6 】

速度モニター 1 0 は、バンチ 3 の周回速度 3 c 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 1 0 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計数するデジタル構造のものが存在する。

【 0 0 5 7 】

位置モニター 1 1 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 1 1 は、例えば、進行軸方向 3 d 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。

10

【 0 0 5 8 】

例えば、バンチ 3 が位置モニター 1 1 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 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、バンチモニター 9、速度モニター 1 0、位置モニター 1 1 は、高周波シンクロトロン of 加速において用いられるものを利用することができる。

20

【 0 0 6 0 】

加速用誘導加速装置 5 は、バンチ 3 が周回する設計軌道 2 が中にある真空ダクトに接続され、バンチ 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。

【 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 1 2、及び前記デジタル信号処理装置 1 2 より出力されたゲート親信号 1 2 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 1 3 a を生成するパターン生成器 1 3 からなる。

30

【 0 0 6 2 】

ゲート親信号 1 2 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 1 2 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 1 3 はゲート親信号 1 2 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。

40

【 0 0 6 3 】

パターン生成器 1 3 は、ゲート親信号 1 2 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) 。

【 0 0 6 5 】

ゲート信号パターン 1 3 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

50

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 1 3 a は加速するバンチ 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、バンチモニター 9 から荷電粒子ビームが該バンチモニター 9 を通過した情報である通過シグナル 9 a、バンチ 3 の周回速度 3 c である速度シグナル 1 0 a、及び位置モニター 1 1 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 1 1 a などである。

10

【 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 1 2 は、可変遅延時間計算機 1 4、可変遅延時間発生器 1 5、加速電圧演算機 1 6、及びゲート親信号出力器 1 7 からなる。

【 0 0 6 8 】

可変遅延時間計算機 1 4 は、可変遅延時間 1 8 を決定する装置である。可変遅延時間計算機 1 4 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 1 8 の定義式が与えられている。

20

【 0 0 6 9 】

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 3 c は荷電粒子の質量に依存する。可変遅延時間 1 8 の変化は荷電粒子の周回速度 3 c に依存するため、これらの情報を予め与えておく。

【 0 0 7 0 】

可変遅延時間 1 8 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。

【 0 0 7 1 】

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 2 b または外側 2 c 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 1 8 を計算した場合は、後述の加速電圧演算機 1 6 で加速電圧 8 a の修正を行うこととなる。

30

【 0 0 7 2 】

また、可変遅延時間 1 8 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 3 a をビーム偏向磁場強度シグナル 4 b として、可変遅延時間計算機 1 4 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 1 8 をバンチ 3 の周回ごとに計算すればよい。

【 0 0 7 3 】

さらに、荷電粒子ビームの周回速度 3 c を測定する速度モニター 1 0 を使用し、リアルタイムで荷電粒子ビームの周回速度 3 c である速度シグナル 1 0 a を可変遅延時間計算機 1 4 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 1 8 を計算することもできる。

40

【 0 0 7 4 】

リアルタイムで可変遅延時間 1 8 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 5 b、バンクコンデンサー 2 4 等に起因して、印加する加速電圧値 8 i 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 3 c に突発的な変化が起こった場合であっても、加速電圧 8 a 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

50

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】

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4a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14a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9a、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14aを受けて、バンチモニター9を通過したバンチ3毎に、次のバンチ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15a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9a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、1kHz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14aを基に、ゲート親信号12a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8a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14aを上記1kHz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15aの発生を遅らせる制御を行う。

【0084】

ここで、通過シグナル9a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9a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

10

20

30

40

50

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 1 8 の開始時間の基準である。

【 0 0 8 6 】

加速電圧演算機 1 6 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。

【 0 0 8 7 】

例えば、ある瞬間に必要な加速電圧値 8 i が 0 . 5 k V である場合、1 = パルス 1 6 a を発生させる、0 = パルス 1 6 a を発生させないと定義し、1 . 0 k V の一定値の加速電圧 8 a を用いて、パンチ 3 が 1 0 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、パンチ 3 が 1 0 周回の間に受けた平均的な加速電圧値（図 6）は 0 . 5 k V となる。このようにして、加速電圧演算機 1 6 が加速電圧 8 a をデジタル制御する。

10

【 0 0 8 8 】

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まっているときは、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）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。

【 0 0 8 9 】

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 8 i を 0 V から 1 k V 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 0 k V、0 . 1 ~ 0 . 2 秒間は 0 . 1 k V、0 . 2 ~ 0 . 3 秒間は 0 . 2 k V、・・・、0 . 9 ~ 1 . 0 秒間は 1 . 0 k V とする等のデータテーブルである。

20

【 0 0 9 0 】

制御単位あたりの荷電粒子ビームの周回数が n 周であるとき、その間に加速電圧 8 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 8 i の m / n 倍になる。

【 0 0 9 1 】

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、制御単位内に含まれる荷電粒子ビームの周回数が十分少ない場合に成り立つ。この制御単位中の荷電粒子ビームの周回数は、制御単位中の荷電粒子ビームの周回数を少な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から制御単位中の荷電粒子ビームの周回数を多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。

30

【 0 0 9 2 】

例えば、制御単位を 1 0 周回とし、加速電圧値を V_0 とすると、加速電圧値を 0 . 1 · V_0 ごとに 1 0 段階に制御することができる。制御単位をパンチ 3 の 2 0 周回とすると、0 . 0 5 · V_0 ごとに 2 0 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。

【 0 0 9 3 】

しかし、上述のように、加速電圧 8 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 8 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）。

40

【 0 0 9 4 】

加速電圧演算機 1 6 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 8 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 2 c へ移動するかの情報を加速電圧演算機 1 6 に与えておく必要がある。

【 0 0 9 5 】

次に、加速電圧演算機 1 6 は、設計軌道 2 にある位置モニター 1 1 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 1 1 a 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パンチ 3 の周回毎にリア

50

ルタイムで行う。

【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 \dot{r} 、磁場強度 $3a$ 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。

$$V = C_0 \times (B' \times r + B \times \dot{r}) \cdots \text{式(1)}$$

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。

【0097】

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

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。

10

【0098】

\dot{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 $3a$ 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。

$$\dot{r} = r / (n \cdot t) \cdots \text{式(3)}$$

$$B' = B / (n \cdot t) \cdots \text{式(4)}$$

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

【0099】

20

1周当たりのバンチ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 $3c$ 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、バンチ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 δa を印加する、又は、過剰な加速電圧値に相当する加速電圧 δa の印可を停止する。

【0101】

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

30

【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 δi がその瞬間に必要な加速電圧値 δi 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 δi 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 δi を減じたパルス密度(図7)に修正する。

【0104】

40

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 δi 、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 δi に相当する加速電圧 δa の印可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。

【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

50

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。

【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。

10

【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8iを、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8i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3a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。

20

【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。

30

【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。

40

【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

50

が、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 16 a 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 にあるバンチモニター 9 からの通過シグナル 9 a を基に、スイッチング電源 5 a の駆動を制御するゲート信号パターン 13 a の基となるゲート親信号 12 a 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。

10

【0119】

リアルタイムで可変遅延時間 18、必要な加速電圧値 8 i 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 8 a 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 8 a 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。バンチモニター 9 からの通過シグナル 9 a が可変遅延時間発生器 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】

20

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。

30

【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】

40

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。

50

【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、加速電圧8a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8a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3e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9aの伝達時間9b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12aを基に加速用誘導加速セル7で加速電圧8aを印加するまでに要する伝達時間9c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3eが1マイクロ秒であるとし、通過シグナル9aの伝達時間9bが0.2マイクロ秒、ゲート親信号12aが発生してから、加速電圧8aが発生するまでに要する伝達時間9c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。

【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。

【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】

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

ここで、 (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。 (t) は次式(9)によって求められる。

【0135】

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

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

【0136】

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

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】

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

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。

【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

10

20

30

40

50

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、パンチモニター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。

10

【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1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、パンチ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12GeVPS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19cしたときの値である。

20

【0143】

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

【0144】

縦軸 t (μs) は、パンチ3がパンチモニター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8aを制御するゲート信号パターン13a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、パンチモニター9からの通過シグナル9a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。

【0145】

陽子ビームのエネルギーレベルは、周回速度3cによって一意に定まる。また、陽子ビームの周回速度3c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3c、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。

30

【0146】

図4(A)のグラフは、理想的な可変遅延時間パターン18aと、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である。

【0147】

理想的な可変遅延時間パターン18a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8aを印加するために、陽子ビームのパンチ3の周回毎に調節されたとしたならば、パンチ3がパンチモニター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12a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。

40

【0148】

必要な可変遅延時間パターン18bとは、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。 必要な可変遅延時間パターン18b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15aの制御精度が $\pm 0.01 \mu s$ であること、パンチ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1

50

8 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。

【0149】

従って、可変遅延時間 1 8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 1 8 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 1 9 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 1 8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 1 8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 1 8はほぼ0に近くなる。

10

【0151】

図4(B)は加速時間とともに、デジタル信号処理装置 1 2で計算され、出力されるゲート親信号 1 2 aの可変遅延時間 1 8が短くなっている様子を示している。横軸 t (μs)は可変遅延時間 1 8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 1 9 cの直後に $1 \mu s$ の可変遅延時間 1 8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 1 8でよい。

【0153】

バンチモニター 9より得られる通過シグナル 9 aを基に、デジタル信号処理装置 1 2によって、ゲート親信号 1 2 aの可変遅延時間 1 8を制御することで、入射 1 9 c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得て加速電圧 8 aを印加することが可能であることを意味する。

20

【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 1 4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 8 d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 1 8 aに対応した必要な可変遅延時間パターン 1 8 b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。

30

【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12 GeV PSによる陽子ビームを加速する場合の磁場励磁パターン 1 9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 1 9 c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 3 aである。第2縦軸 v は加速電圧値 8 iである。

【0157】

遅い繰り返しとは、荷電粒子が前段加速器から入射 1 9 cされた時間を基準に、加速を経て、出射し、さらに次の入射 1 9 c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 1 9による加速のことをいう。

40

【0158】

この磁場励磁パターン 1 9は、荷電粒子ビームが入射 1 9 cされた直後から、磁場強度 3 a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 1 9 cの直後から、磁場強度 3 a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 1 9を非線形励磁領域 1 9 a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 1 9を線形励磁領域 1 9 bという。

【0159】

50

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 8 a 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。

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

すなわち、ある時間での必要な加速電圧値 8 i 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 19 a では、磁場強度 3 a 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。

10

【0161】

一方、線形励磁領域 19 b での理想的な加速電圧値 8 k 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 19 b おいて、一定電圧値の加速電圧 8 a 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 8 a 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 8 a を印加した次回は、リセット電圧 8 b が必要である。

【0162】

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。

20

【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。

30

【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、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 の制御単位を 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 を 10 段階の加速電圧値 8 i に分割できることとなる。

40

【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

50

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。

【 0 1 7 0 】

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 を印加することが必要である。

【 0 1 7 1 】

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。

10

【 0 1 7 2 】

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パンチ 3 の周回数を、ここでは、制御単位 21 という。

【 0 1 7 3 】

t 1 は、非線形励磁領域 19 a の制御単位 21 が 10 周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 周回であるときの制御単位 21 に要する時間を意味する。

【 0 1 7 4 】

20

パルス密度 20 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 16 に予め与えることも、加速電圧演算機 16 でリアルタイム計算することができる。

【 0 1 7 5 】

\underline{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。 \underline{V}_1 の値は、t 1 の間、すなわちパンチ 3 が 10 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 \underline{V}_0 の加速電圧 8 a を印加したとき、 $\underline{V}_1 = 7 / 10 \cdot \underline{V}_0 = 0.7 \underline{V}_0$ として計算できる。

【 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リセット電圧 8 g も印加されないことを意味する。

30

【 0 1 7 7 】

このようにパルス密度 20 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 19 a の磁場励磁パターン 19 に同期することが可能になった。

【 0 1 7 8 】

当然に、線形励磁領域 19 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 \underline{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 \underline{V}_0 の加速電圧 8 a を印加する。すなわち $\underline{V}_2 = 10 / 10 \cdot \underline{V}_0 = \underline{V}_0$ である。

40

【 0 1 7 9 】

従って、前記制御単位 21 に荷電粒子ビームに印加された加速電圧値 (V a v e) 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 (\underline{V}_0)、及び前記制御単位 21 の加速電圧 8 a の印加回数 (N o n) と停止した加速電圧 8 f の回数 (N o f f) から、次式 (13) によって計算できる。

$$V a v e = \underline{V}_0 \cdot N o n / (N o n + N o f f) \cdots \text{式 (13)}$$

【 0 1 8 0 】

50

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、バンチ 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。

【 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、バンチ 3 の周回毎に一定電圧値である加速電圧 8 a を印加すればよいこととなる。

10

【 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。

20

【 0 1 8 5 】

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。

【 0 1 8 6 】

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。

【 0 1 8 7 】

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。

30

【 0 1 8 8 】

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。

【 0 1 8 9 】

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。

40

【 0 1 9 0 】

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。

【 0 1 9 1 】

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

50

密度 20 を、加速電圧演算機 16 に格納した別のパルス密度 20 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 18、加速電圧 8a のオンおよびオフを制御する場合には、バンチ 3 の周回毎に加速電圧 8a 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 19a においても、線形励磁領域 19b 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 4b 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。

10

【0194】

従って、外側 2c にズレた荷電粒子ビームは、過剰分に相当する加速電圧 81 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 8e は、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 より、高い加速電圧値 8i 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 8i は、理想的な加速電圧値パターン 8c より大きくなる。そこで、磁場励磁パターン 19 に同期させるためには、一定の制御単位 21 において、加速電圧 8a の発生を上述した方法により停止し、パルス密度 20 を修正すればよい。

【0196】

20

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 21 のパルス密度 20 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 8a 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 19 に同期して、加速電圧 8a 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 2c 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 2c 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。

30

【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 21 当たりのパルス密度 20 を修正して、一定電圧値の加速電圧 8a 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 8a 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 2c 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できることとなる。

【0200】

40

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、さらに次回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 19 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。

50

【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18、誘導電圧のパルス密度20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、従来のシンクロトロン、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。

【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。

【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】

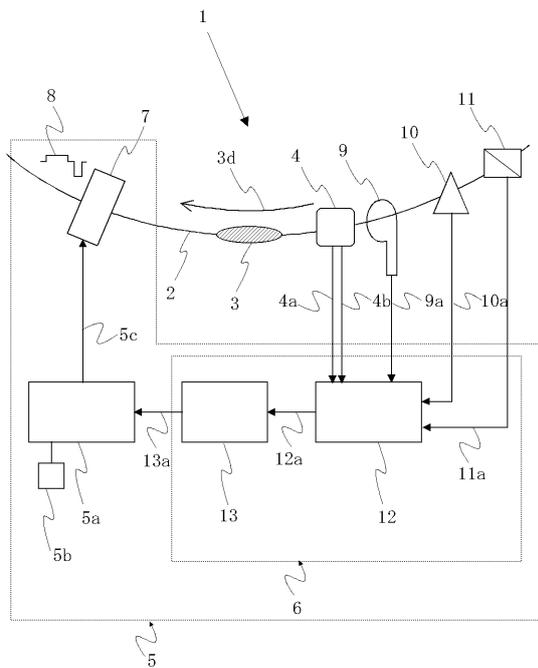
【0206】

- | | | |
|-----|---------------|----|
| 1 | シンクロトロン | |
| 2 | 設計軌道 | |
| 2 a | 真空ダクト中心 | 30 |
| 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 | |
| 3 e | 移動時間 | |
| 4 | 偏向電磁石 | 40 |
| 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 | |
| 7 a | 加速ギャップ | |
| 8 | 加速用の誘導電圧 | 50 |

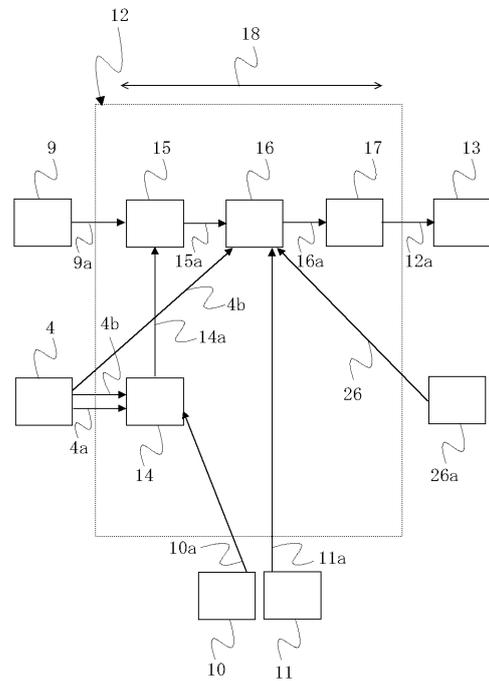
8 a	加速電圧	
8 b	リセット電圧	
8 c	理想的な加速電圧値パターン	
8 d	等価的な加速電圧値パターン	
8 e	加速電圧の設定値	
8 f	加速電圧	
8 g	リセット電圧	
8 h	平均的な加速電圧値	
8 i	加速電圧値	
8 j	加速電圧値	10
8 k	加速電圧値	
8 l	加速電圧	
9	バンチモニター	
9 a	通過シグナル	
9 b	伝達時間	
9 c	伝達時間	
10	速度モニター	
10 a	速度シグナル	
11	位置モニター	
11 a	位置シグナル	20
12	デジタル信号処理装置	
12 a	ゲート親信号	
13	パターン生成器	
13 a	ゲート信号パターン	
14	可変遅延時間計算機	
14 a	可変遅延時間シグナル	
15	可変遅延時間発生器	
15 a	パルス	
16	加速電圧演算機	
16 a	パルス	30
17	ゲート親信号出力器	
18	可変遅延時間	
18 a	理想的な可変遅延時間パターン	
18 b	必要な可変遅延時間パターン	
18 c	制限時間単位	
19	磁場励磁パターン	
19 a	非線形励磁領域	
19 b	線形励磁領域	
19 c	入射	
19 d	一定時間	40
20	パルス密度	
20 a	パルス間隔	
20 b	パルス密度	
21	制御単位	
22	バリアー電圧	
22 a	負のバリアー電圧	
22 b	正のバリアー電圧	
23	加速用誘導加速装置の等価回路	
24	バンクコンデンサー	
24 a	第1スイッチ	50

- 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

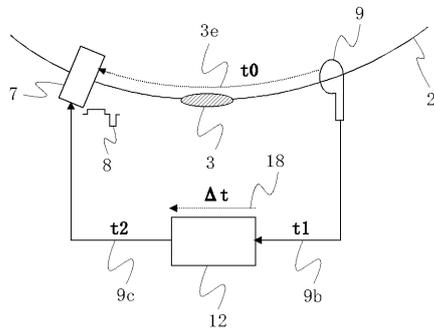
【図1】



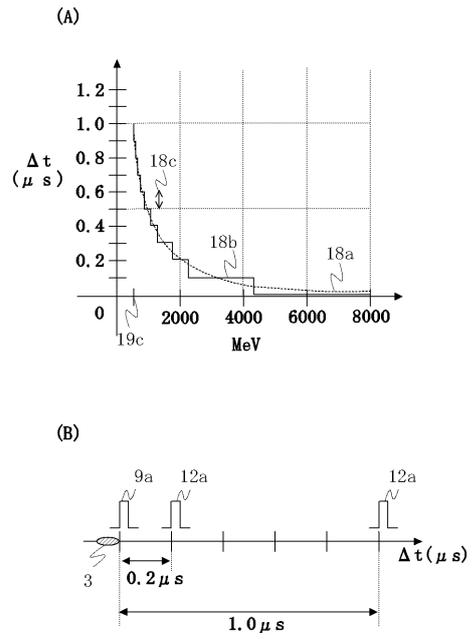
【図2】



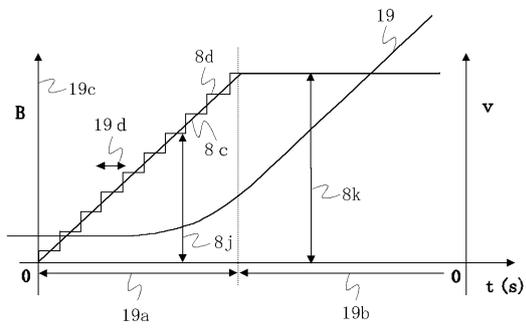
【 図 3 】



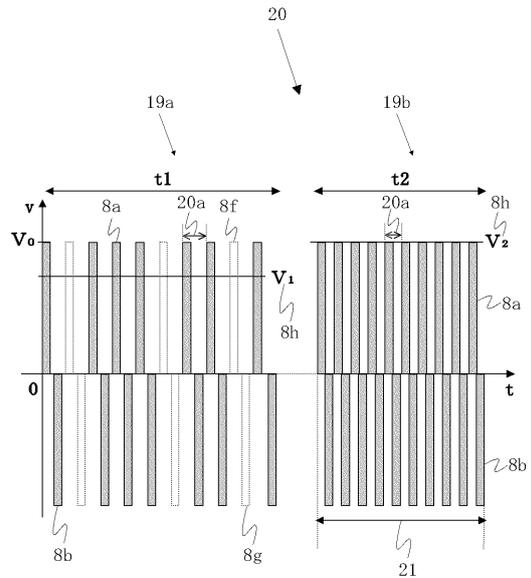
【 図 4 】



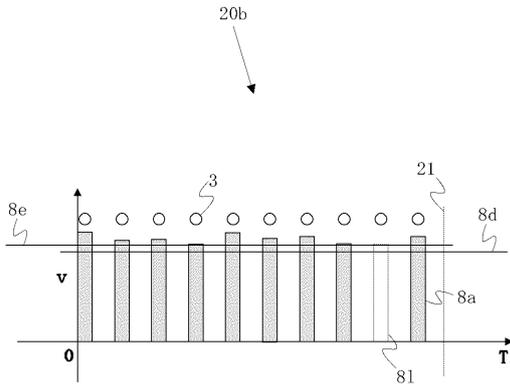
【 図 5 】



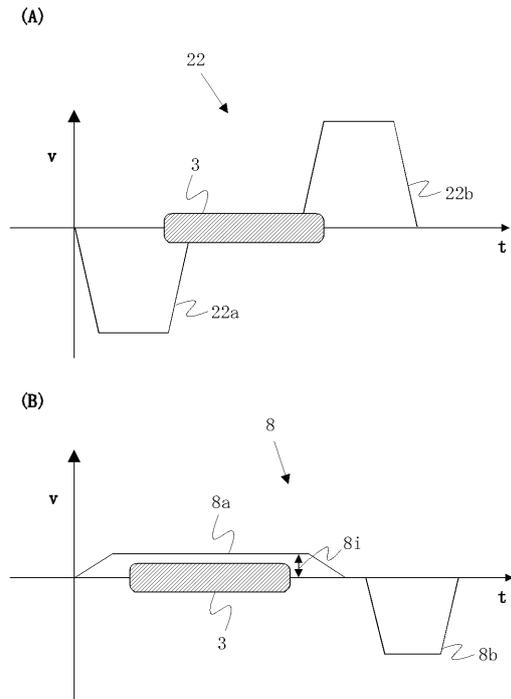
【 図 6 】



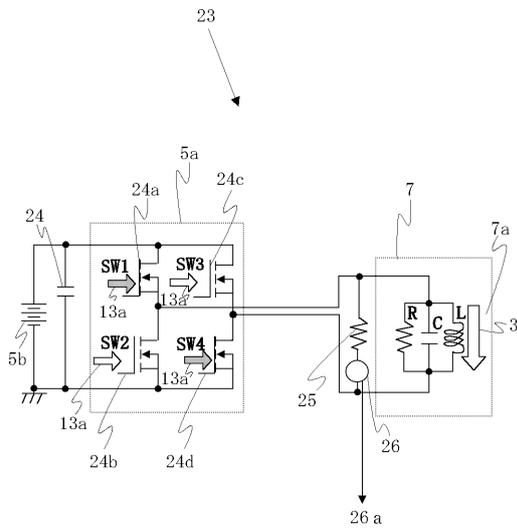
【 図 7 】



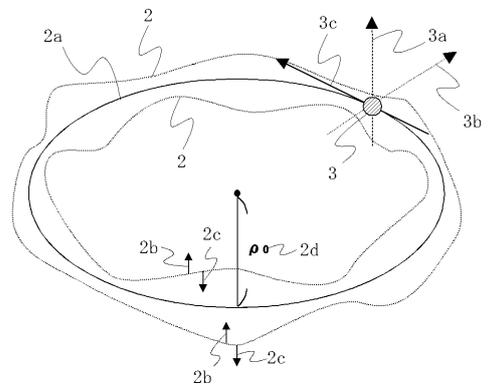
【 図 8 】



【 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

審査官 青木 洋平

- (56)参考文献 特開2002-367800(JP,A)
特開2003-100500(JP,A)
特開平05-326198(JP,A)
特開2000-232000(JP,A)
特開平04-079200(JP,A)
特開2002-237399(JP,A)
K.Takayama et. al., Observation of the Acceleration of a Single Bunch by Using the Induction Device in the KEK Proton Synchrotron, Physical Review Letters, 米国, The American Physical Society, 2005年 4月15日, Vol.94, 144801-1~144801-4