

(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2007-18756

(P2007-18756A)

(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2005-196223 (P2005-196223)	(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5日(2005.7.5)	(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

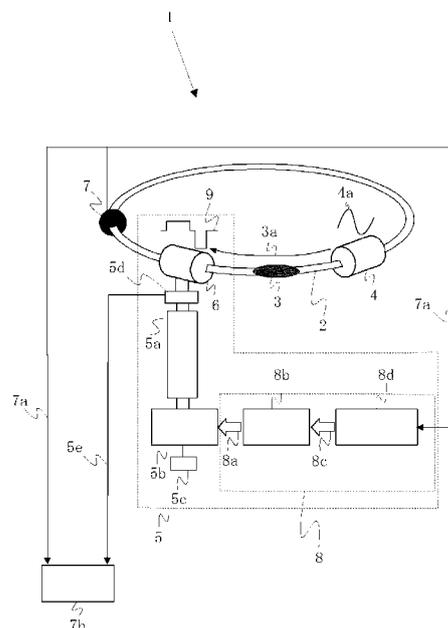
(54) 【発明の名称】 誘導電圧制御装置及びその制御方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 加速用誘導加速セルによる一定電圧の加速電圧であっても、あらゆる磁場励磁パターンに同期して、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のできる誘導電圧制御装置及びその制御方法を提供すること。

【解決手段】 磁場励磁パターンを基に求められる必要な可変遅延時間パターン、及び等価的な加速電圧値パターンと、バンチモニター7からのバンチ3の通過シグナル7aを基に可変遅延時間を制御するデジタル信号処理装置8d、及びスイッチング電源5bのゲート信号パターン8aへと変換するパターン生成器8bからなり、制御単位あたりの加速用の誘導電圧のパルス密度を制御する。

【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、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生成器と、前記オンオフ選択器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し、可変遅延時間の経過後に出力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とからなる加速用の誘導電圧の発生タイミングを制御することを特徴とする誘導電圧制御装置。

10

【請求項 2】

誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、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生成器と、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生成器と、前記オンオフ選択器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し、可変遅延時間の経過後に出力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、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルに加速するために制御単位の加速用の誘導電圧のパルス密度を制御することを特徴とする誘導電圧の制御方法。

20

30

【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、前記シンクロトロンを構成する偏向電磁石からの磁場強度であるビーム偏向磁場強度シグナル、及び設計軌道上の荷電粒子ビームの周回周波数を基に可変遅延時間をリアルタイムで計算し、前記可変遅延時間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器と、前記シンクロトロンを構成する偏向電磁石からの磁場強度であるビーム偏向磁場強度シグナルを基に加速電圧値をリアルタイムで計算し、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生成器と、前記オンオフ選択器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し、可変遅延時間の経過後に出力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、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルに加速するために制御単位の加速用の誘導電圧のパルス密度をリアルタイム制御することを特徴とする誘導電圧の制御方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

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、加速用の誘導電圧をシンクロトロンを構成する偏向電磁石の磁場励磁パターンに同期させ、荷電粒子を加速するための誘導電圧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、高周波加速空洞4によって高周波シンクロトロンを構成する強収束を保證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。

10

【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印加して加速する円形加速器である。図13に高周波加速空洞による陽子ビームの加速原理を、図14に誘導加速セルによる陽子ビームの加速原理を示した。

【0005】

図13(A)は、入射された陽子が数個のバンチ3として高周波シンクロトロン21の設計軌道2を周回している様子を示している。バンチ3は、高周波加速空洞4に到達すると、磁場励磁パターンに同期した高周波加速電圧21aを印加されることにより、所定のエネルギーレベルまで加速される。

20

【0006】

図13(B)は、バンチ3とバンチ3に印加される高周波加速電圧21aの関係を示している。横軸tは、高周波加速空洞4内の時間的变化を表している。縦軸vは、高周波加速電圧値である。Vofsは、加速のある瞬間に偏向電磁石の磁場励磁パターンの傾き(時間的变化率)から計算されたバンチ3の加速に必要な高周波加速電圧値21bである。

【0007】

バンチ3は高周波加速空洞4によって、加速に必要な電圧を偏向電磁石の磁場励磁パターンの傾き(時間的变化率)から計算されたVofs(高周波加速電圧値21b)を印加される。高周波加速電圧21aは、バンチ3の加速に必要な電圧を与える機能と、バンチ3が進行軸方向に拡散することを防止する閉じ込め機能を併せ持っている。

30

【0008】

特に、閉じ込め機能を位相安定性と呼ぶことがある。高周波シンクロトロン21で荷電粒子ビームを加速する場合には、前記二つの機能が必ず必要である。前記二つの機能をもつ高周波加速電圧21aの時間帯は限られている。図13(B)のグレーで示した時間帯は加速に利用することができないことがこれまでに分かっている。

【0009】

ここで位相安定性とは、荷電粒子が高周波加速電圧21aによって進行軸方向への収束力を受けて、個々の荷電粒子がバンチ3化し、そのバンチ3の中を荷電粒子の進行軸方向に往きつ戻りつしながら高周波シンクロトロン21の中を周回することをいう。

40

【0010】

また、バンチ3とは荷電粒子が位相安定性を受け、設計軌道2を周回する荷電粒子群のことをいう。

【0011】

図14(A)は、誘導加速セルを用いたシンクロトロン22によって、従来の高周波シンクロトロン21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マイクロ秒にも達するバンチ3(以下、スーパーバンチ3bという。)を加速

50

する様子を示している。この場合、誘導加速セルを用いたシンクロトロン 2 2 の陽子ビームが周回する設計軌道 2 に構造を同じくする誘導加速セルを 2 台以上配置させる必要がある。

【 0 0 1 2 】

この二つの誘導加速セルの一方はスーパーバンチ 3 b の閉じ込め機能を与える誘導加速セル（以下、閉込用誘導加速セル 2 3 という。）であり、他方は偏向電磁石の磁場励磁パターンに同期して、スーパーバンチ 3 b の加速に必要な電圧を印加する機能を与える誘導加速セル（以下、加速用誘導加速セル 6 という。）である。この二つの誘導加速セルによって、シンクロトロン 2 2 の運転に必要な閉じ込め機能と加速機能を与える。この二つの誘導加速セルは、通常のバンチ 3 に対しても同じ機能を与えることができる。

10

【 0 0 1 3 】

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。

【 0 0 1 4 】

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。

【 0 0 1 5 】

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発生する。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。

20

【 0 0 1 6 】

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。

【 0 0 1 7 】

図 1 4 (B) は、誘導加速セルによってスーパーバンチ 3 b を閉じ込め、及び加速する様子を示している。横軸 t は、スーパーバンチ 3 b が閉込用誘導加速セル 2 3 に到達した時間を基準にした誘導電圧の発生タイミング、及び誘導電圧を印加する長さ（以下、印加時間という。）である。

30

【 0 0 1 8 】

なお、加速用誘導加速セル 6 に印加される誘導電圧の発生タイミングと印加時間は、閉込用誘導加速セル 2 3 と 1 / 2 の周回時間 2 4 のズレがある。縦軸 v は誘導電圧値である。V o f s は、加速のある瞬間に磁場励磁パターンの傾き（時間変化率）から計算されたスーパーバンチ 3 b の加速に必要な加速電圧値 9 k である。

【 0 0 1 9 】

ここで誘導電圧とは、誘導加速セルによって、荷電粒子に印加させる電圧である。閉込用誘導加速セル 2 3 で印加する誘導電圧をバリアー電圧といい、特に荷電粒子ビームの頭部に印加するものを負のバリアー電圧 2 3 a、荷電粒子ビームの尾部に印加するものを正のバリアー電圧 2 3 b という。スーパーバンチ 3 b である場合も同じである。

40

【 0 0 2 0 】

その結果、閉込用誘導加速セル 2 3 においては、高周波加速空洞 4 と同様にバンチ 3 に位相安定性を与えることができる。しかし、1 つの誘導加速セルのみでは、荷電粒子ビームの加速は行えないので、別に加速用誘導加速セル 6 が必要になる。

【 0 0 2 1 】

加速用誘導加速セル 6 で印加する誘導電圧を加速用の誘導電圧といい、特に荷電粒子ビームの全体に印加するものを加速電圧 9 a、加速用誘導加速セル 6 の磁氣的飽和を回避す

50

るための誘導電圧をリセット電圧 9 b という。スーパーバンチ 3 b である場合も同じである。

【 0 0 2 2 】

なお、リセット電圧 9 b は、閉込用誘導加速セル 2 3 においては、正のバリアー電圧 2 3 b に該当するが、正のバリアー電圧 2 3 b がバンチ 3 の尾部に印加されバンチ 3 の閉じ込めに利用されるに對して、リセット電圧 9 b は、荷電粒子ビームが存在しない時間帯（グレーで示した時間帯）に磁氣的飽和を回避させるためだけに印加させる。

【 0 0 2 3 】

ここで閉じ込めとは、荷電粒子ビームを構成する荷電粒子が、必ず運動エネルギーのばらつきを持っているために必要となる機能である。運動エネルギーのばらつきは、荷電粒子ビームが設計軌道 2 を 1 周した後、同じ位置へ到達する時間の違いをもたらす。この時間差は閉じ込めを行わない限り、周回を重ねるごとに大きくなり、荷電粒子ビームは設計軌道 2 の全体に渡って拡散してしまう。

10

【 0 0 2 4 】

荷電粒子ビームの頭部および尾部に、負および正バリアー電圧 2 3 a、2 3 b が印加されるようにすると、エネルギーが過剰で周回が早まった荷電粒子には負のバリアー電圧 2 3 a によってエネルギーが失われエネルギー不足な状態なり、エネルギーが不足して周回が遅れた荷電粒子には正のバリアー電圧 2 3 b によってエネルギーが与えられてエネルギー過剰な状態になる。

【 0 0 2 5 】

これにより、周回が速い粒子は周回が遅れ、逆に周回が遅れた粒子は周回が早まる。結果として荷電粒子ビームを進行軸方向のある領域に局在させることができる。この一連の働きを荷電粒子ビームの閉じ込めと呼ぶ。

20

【 0 0 2 6 】

従って、閉込用誘導加速セル 2 3 の機能は、従来の高周波加速空洞 4 の閉じ込めの機能だけを分離したものと等価である。

【 0 0 2 7 】

閉込用とは、入射装置より誘導加速セルを用いたシンクロトロン 2 2 に入射された荷電粒子ビームを、誘導加速セルによる所定のバリアー電圧によって、別の誘導加速セルで誘導加速できるように一定の長さのバンチ 3 まで縮めたり、その他種々の長さの荷電粒子ビーム

30

【 0 0 2 8 】

加速用とは、バンチ 3 を形成後にバンチ 3 の全体に、加速用の誘導電圧を与える機能を有しているとの意味である。

【 0 0 2 9 】

図 1 4 (C) は、閉込用誘導加速セル 2 3 の閉じ込め機能のみを示している。図 1 4 (D) は、加速用誘導加速セル 6 の加速機能のみを示している。横軸 t (a) は、スーパーバンチ 3 b が閉込用誘導加速セル 2 3 に到達した時間を基準にした、バリアー電圧の発生タイミングと印加時間である。横軸 t (b) は、スーパーバンチ 3 b が加速用誘導加速セル 6 に到達する時間を基準にした、加速用の誘導電圧 9 の発生タイミングと印加時間である。その他、記号は図 1 4 (B) と同じ。

40

【 0 0 3 0 】

誘導加速セルを用いたシンクロトロン 2 2 による加速では、原理的には、リセット電圧 9 b の印加時間（グレーで示した時間領域）を除いては加速として使用することができることとなる。このように加速に使用できる時間帯を大幅に増すことによって、高周波シンクロトロン 2 1 では、原理的に不可能であったスーパーバンチ 3 b も加速することが可能となると考えられている。

【非特許文献 1】日本物理学会誌 v o l . 5 9 , N o . 9 (2 0 0 4) p 6 0 1 - p 6 1 0

50

【0031】

このようにバリアー電圧によっても、高周波加速電圧21aと同様に陽子ビームを閉じ込めることが可能となった。他方、加速するためには、別の加速装置が必要であるが、陽子や特定の加速可能な荷電粒子であれば、高周波加速空洞4からなる加速装置であってもよい。また、高周波加速空洞4によって陽子ビームを閉じ込め、加速用の誘導電圧9によって加速するような構成であってもよい。

【0032】

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21（以下、12GeVPSという。）内に加速用誘導加速セル6を設置し、高周波加速空洞4と加速用誘導加速セル6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9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。

10

【0033】

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】

20

【0034】

荷電粒子ビームの加速に必要な加速用の誘導電圧9は、偏向電磁石の磁場励磁パターン15の傾き（時間変化率）によって決定されることは前述したが、磁場の時間変化率は磁場励磁パターンによって時間的に異なった値を持つ。このため、荷電粒子ビームの加速開始から終了までには荷電粒子ビームに与える電圧を時間的に変化させなければならない。

【0035】

従来、荷電粒子ビームに与える加速用の誘導電圧9を発生する装置は存在せず、加速用の誘導電圧を調整する方法は存在しなかった。一方、パルス電圧を用いた一般の商用周波数電源装置では、出力電圧調節のためにパルス電圧の振幅およびパルス幅を変化させる方法が従来から用いられている。しかし、従来の方法では、加速用の誘導電圧9を磁場励磁パターン15に同期させることができない。

30

【0036】

誘導電圧を発生する装置（以下、誘導加速装置という。）が必要とする数十kWの安定した出力電力を得るためには、パルス電圧の振幅を定めるスイッチング電源の高圧充電部に大きな静電容量（バンクコンデンサー）を装荷しなければならない。このバンクコンデンサー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。

【0037】

そこで、本発明は上記問題を解決するため、加速用誘導加速セル6による一定電圧の加速電圧9aであっても、パンチ3が誘導加速セルを用いたシンクロトロンに入射された直後の非線形励磁領域を含むあらゆる磁場励磁パターンに同期して、必要な加速電圧9aを印加することにより、任意の荷電粒子を誘導加速セルを用いた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。）加速することのできる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。

40

【0038】

なお、非特許文献2の内容は、磁場励磁パターンの線形励磁領域において、一定間隔で印加する、一定値の加速電圧9aによって、陽子ビームを加速できたことを報告したものである。

【課題を解決するための手段】

50

【0039】

本発明は、上記の課題を解決するために、誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、磁場励磁パターン15を基に計算される理想的な可変遅延時間パターン16に対応する必要な可変遅延時間パターン16aを格納し、前記必要な可変遅延時間パターン16aに基づき可変遅延時間13に相当する可変遅延時間シグナル13bを生成する可変遅延時間計算機13a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7からのバンチ3の通過シグナル7a、前記可変遅延時間計算機13aからの可変遅延時間シグナル13bを受けて、可変遅延時間13に相当するパルス13dを生成する可変遅延時間発生器13cと、磁場励磁パターン15を基に計算される理想的な加速電圧値パターン9cに対応する等価的な加速電圧値パターン9eを格納し、前記可変遅延時間発生器13cからの可変遅延時間13に相当するパルス13dを受けて、加速用の誘導電圧9のオンオフを制御するパルス13fを生成するオンオフ選択器13eと、前記オンオフ選択器13eからのパルス13fを受けて、パターン生成器8bに適したパルスであるゲート親信号8cを生成し、可変遅延時間13の経過後に出力するゲート親信号出力器13gからなるデジタル信号処理装置8d、及び前記ゲート親信号8cをスイッチング電源5bのゲート信号パターン8aへと変換するパターン生成器8bとからなる加速用の誘導電圧9の発生タイミングを制御することを特徴とする誘導電圧制御装置8の構成とした。

10

【発明の効果】

【0040】

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のあらゆる種類の磁場励磁パターンに同期させて、荷電粒子ビームに加速電圧9を印加することができることとなった。

20

【0041】

さらに、従来の高周波シンクロトロン21において、加速する荷電粒子の種類が制限されていたが、その制限を受けることなく、本発明である誘導電圧制御装置8及びその制御方法によって、加速用誘導加速セル6で印加されるほぼ一定値な加速電圧9aであっても、一定のバンチ3の周回数である制御単位15cにおけるパルス密度17を制御することにより、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルまで効率的、かつ容易に高めることができることとなった。

【発明を実施するための最良の形態】

30

【0042】

本発明である誘導電圧の制御方法は、誘導加速セルを用いたシンクロトロンにおいて、磁場励磁パターン15を基に計算される理想的な可変遅延時間パターン16に対応する必要な可変遅延時間パターン16aを格納し、前記必要な可変遅延時間パターン16aに基づき可変遅延時間13に相当する可変遅延時間シグナル13bを生成する可変遅延時間計算機13a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7からのバンチ3の通過シグナル7a、前記可変遅延時間計算機13aからの可変遅延時間シグナル13bを受けて、可変遅延時間13に相当するパルス13dを生成する可変遅延時間発生器13cと、磁場励磁パターン15を基に計算される理想的な加速電圧値パターン9cに対応する等価的な加速電圧値パターン9eを格納し、前記可変遅延時間発生器13cからの可変遅延時間13に相当するパルス13dを受けて、加速用の誘導電圧9のオンオフを制御するパルス13fを生成するオンオフ選択器13eと、前記オンオフ選択器13eからのパルス13fを受けて、パターン生成器8bに適したパルスであるゲート親信号8cを生成し、可変遅延時間13の経過後に出力するゲート親信号出力器13gからなるデジタル信号処理装置8d、及び前記ゲート親信号8cをスイッチング電源5bのゲート信号パターン8aへと変換するパターン生成器8bにより、任意の荷電粒子ビームを任意のエネルギーレベルに加速するために、制御単位15cの加速用の誘導電圧9のパルス密度17を制御することによって実現した。

40

【実施例1】

【0043】

50

以下に、添付図面に基づいて、本発明である誘導電圧制御装置について詳細に説明する。図 1 は本発明である誘導電圧制御装置により制御される誘導加速セルを用いた実験用のシンクロトロンの概略図である。

【0044】

本発明で使用した実験用のシンクロトロン 1 は、前段加速器により一定エネルギーレベルまで加速され、入射された陽子ビームが周回する設計軌道 2 の強収束を保證する偏向電磁石、収束電磁石など、従来の KEK の 12 GeV PS の装置をそのまま利用した。陽子ビームの閉じ込めは、従来の高周波加速空洞 4 を含む高周波加速装置による高周波 4 a の制御で行った。陽子ビームの加速は、新たに組み込んだ加速用誘導加速装置 5 を用いた。

【0045】

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 a に加速するための加速用の誘導電圧 9 を印加する加速用誘導加速セル 6、前記加速用誘導加速セル 6 に伝送線 5 a を介してパルス電圧を与える高繰り返し動作可能なスイッチング電源 5 b、前記スイッチング電源 5 b に電力を供給する DC 充電器 5 c、前記スイッチング電源 5 b のオンおよびオフの動作を制御する誘導電圧制御装置 8、前記加速用誘導加速セル 6 より印加された誘導電圧値を知るための誘導電圧モニター 5 d からなる。

【0046】

本発明である誘導電圧制御装置 8 は、スイッチング電源 5 b のオンおよびオフの動作を制御するゲート信号パターン 8 a を生成するパターン生成器 8 b、及び前記パターン生成器 8 b によるゲート信号パターン 8 a の生成のもと信号であるゲート親信号 8 c を計算するデジタル信号処理装置 8 d からなる。

【0047】

ゲート信号パターン 8 a とは、加速用誘導加速セル 6 による加速用の誘導電圧 9 を制御する信号である。具体的には、加速電圧 9 a の発生タイミングと印加時間、リセット電圧 9 b の発生タイミングと印加時間を決定する信号と、加速電圧 9 a およびリセット電圧 9 b の間の加速用の誘導電圧 9 を印加しない時間を決定するための信号からなる。従って、ゲート信号パターン 8 a によって、加速用の誘導電圧 9 の発生タイミングと印加時間を加速する荷電粒子ビームの長さにあわせて調節することが可能である。

【0048】

パターン生成器 8 b は、ゲート親信号 8 c をスイッチング電源 5 b 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。

【0049】

スイッチング電源 5 b 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 6）に正と負の電圧を発生する（図 2）。

【0050】

バンチ 3 の通過に加速用の誘導電圧 9 の発生タイミングと印加時間を合わせるためには、真空ダクトに取り付けられたバンチ 3 の通過を感知するバンチモニター 7 から、バンチ 3 の通過情報である通過シグナル 7 a を用いて、デジタル信号処理装置 8 d によって制御する。

【0051】

なお、加速実験の結果を観察するために、実験用のシンクロトロン 1 にバンチ 3 の通過シグナル 7 a、誘導電圧シグナル 5 e を検出するオシロスコープ 7 b を接続した。

【0052】

図 2 は加速用誘導加速装置の等価回路である。加速用誘導加速装置の等価回路 10 は、DC 充電器 5 c から常時給電を受けるスイッチング電源 5 b が、伝送線 5 a を経由して加速用誘導加速セル 6 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 6 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 が感じる加速電圧 9 a である。

10

20

30

40

50

【0053】

図2の回路状態は、第1スイッチ11a、及び第4スイッチ11dがゲート信号パターン8aによりオンになっており、バンクコンデンサ11に充電された電圧が加速用誘導加速セル6に印加され、加速ギャップ6aにバンチ3を加速するための加速電圧9aが生じている状態である。

【0054】

次に、オンになっていた第1スイッチ11a、及び第4スイッチ11dがゲート信号パターン8aによりオフになり、第2スイッチ11b、及び第3スイッチ11cがゲート信号パターン8aによりオンになって、前記加速ギャップ6aに前記誘導電圧と逆向きのリセット電圧9bが生じ、加速用誘導加速セル6の磁性体の磁氣的飽和をリセットする。

10

【0055】

そして、第2スイッチ11b、及び第3スイッチ11cがゲート信号パターン8aによりオフになり、第1スイッチ11a、及び第4スイッチ11d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8aにより繰り返すことで、バンチ3の加速に必要な加速用の誘導電圧9を発生させることが可能となる。

【0056】

前記、ゲート信号パターン8aは、スイッチング電源5bの駆動を制御する信号であり、バンチ3の通過シグナル7aを基に、デジタル信号処理装置8d、及びパターン生成器8bからなる誘導電圧制御装置8でデジタル制御される。

【0057】

なお、バンチ3に印加された加速用の誘導電圧9の値は、回路中の電流値とマッチング抵抗12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5dによって電流値を測定することで、印加した加速用の誘導電圧9の値を知ることができる。そこで、加速用の誘導電圧9の値を誘導電圧シグナル5eとして、デジタル信号処理装置8dにフィードバックし、誘導電圧制御の方法に利用することもできる。

20

【0058】

図3は、バンチの周回と加速用の誘導電圧の発生タイミングを合わせるための可変遅延時間についての説明図である。加速用の誘導電圧9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6に到達した時間に合わせて加速電圧9aを印加しなければならない。

30

【0059】

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、単位時間当たりに設計軌道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12GeVPS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、667kHzから882kHzまで変化する。

【0060】

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3dに合わせて加速電圧9aを印加させ、また、バンチ3が加速用誘導加速セル6に存在しない時間帯にリセット電圧9bを発生させなければならない。

【0061】

また、誘導加速セルを用いたシンクロトロンを含む円形加速器は広い敷地に設置させるため、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。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。

40

【0062】

そこで、上記問題を解決するため、デジタル信号処理装置8dを用いて、バンチモニター7の通過シグナル7aの発生から加速電圧9a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8dの内部で、バンチモニター7からの通過シ

50

グナル 7 a を受けてから、ゲート親信号 8 c の発生までの時間を制御する。以下、この制御される時間のことを可変遅延時間 1 3 という。

【 0 0 6 3 】

可変遅延時間 1 3 である t は、パンチ 3 が設計軌道 2 のいずれかに置かれたパンチモニター 7 から、加速用誘導加速セル 6 に到達するまでの移動時間 3 d を t_0 、パンチモニター 7 からデジタル信号処理装置 8 d までの通過シグナル 7 a の伝達時間 7 c を t_1 、及びデジタル信号処理装置 8 d から出力されたゲート親信号 8 c を基に加速用誘導加速セル 6 で加速電圧 9 a を印加するまでに要する伝達時間 7 d を t_2 とすると、次式 (1) で求められる。

$$t = t_0 - (t_1 + t_2) \cdots \text{式 (1)}$$

10

【 0 0 6 4 】

例えば、ある加速時間でのパンチ 3 の移動時間 3 d が 1 マイクロ秒であるとし、通過シグナル 7 a の伝達時間 7 c が 0 . 2 マイクロ秒、ゲート親信号 8 c が発生してから、加速電圧 9 a が発生するまでに要する伝達時間 7 d が 0 . 3 マイクロ秒であるならば、可変遅延時間 1 3 は、0 . 5 マイクロ秒となる。

【 0 0 6 5 】

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 9 a をパンチ 3 に印加するためには、 t をパンチ 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を構成する各装置を設置すれば、一定の値である。

20

【 0 0 6 6 】

t_0 は、荷電粒子ビームの周回周波数 ($f_{R E V} (t)$)、及びパンチモニター 7 から加速用誘導加速セル 6 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。

【 0 0 6 7 】

ここで、 t_0 を荷電粒子ビームの周回周波数 ($f_{R E V} (t)$) 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 (2) によってリアルタイムで計算することができる。

$$t_0 = L / (f_{R E V} (t) \cdot C_0) [\text{秒}] \cdots \text{式 (2)}$$

$f_{R E V} (t)$ は次式 (3) によって求められる。

30

【 0 0 6 8 】

$$f_{R E V} (t) = (t) \cdot c / C_0 [\text{Hz}] \cdots \text{式 (3)}$$

ここで、 (t) は相対論的粒子速度、 c は光速 ($c = 2 . 9 9 8 \times 1 0^8 [\text{m} / \text{s}]$) である。 (t) は次式 (4) によって求められる。

【 0 0 6 9 】

$$(t) = (1 - (1 / ((t)^2))) [\text{無次元}] \cdots \text{式 (4)}$$

ここで、 (t) は相対論係数である。 (t) は次式 (5) によって求められる。

【 0 0 7 0 】

$$(t) = 1 + T (t) / E_0 [\text{無次元}] \cdots \text{式 (5)}$$

ここで、 $T (t)$ は加速電圧 9 a 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 (6) によって求められる。

40

【 0 0 7 1 】

$$T (t) = \rho \cdot C_0 \cdot e \cdot B (t) [\text{eV}] \cdots \text{式 (6)}$$

ここで、 ρ は偏向電磁石の極率半径、 C_0 は荷電粒子ビームが周回する設計軌道 2 の全長、 e は荷電粒子が持つ電荷量、 $B (t)$ は加速開始からのビーム偏向磁場強度の増加分である。

【 0 0 7 2 】

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。

【 0 0 7 3 】

50

上述の一連の可変遅延時間 13 である t を求める式を定義式という。可変遅延時間 13 をリアルタイムに求める時は、定義式をデジタル信号処理装置 8 d の可変遅延時間計算機 13 a に格納する。

【0074】

従って、可変遅延時間 13 は、バンチモニター 7 から加速用誘導加速セル 6 の距離 (L)、荷電粒子ビームが周回する設計軌道 2 の全長 (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 15 によって、一意に定まる。

【0075】

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 13 も一意に定まる。従って、バンチ 3 が、磁場励磁パターン 15 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 13 を計算しておくこともできる。

【0076】

しかし、上述したように、荷電粒子ビームに印加される加速電圧 9 a は、毎回一定値であるとは限らない。よって、効率的な加速をするためには、可変遅延時間 13 をリアルタイムで計算することが望ましい。

【0077】

図 4 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 8 d は、可変遅延時間計算機 13 a、可変遅延時間発生器 13 c、オンオフ選択器 13 e およびゲート親信号出力器 13 g からなる。

【0078】

可変遅延時間計算機 13 a は、可変遅延時間 13 を決定する装置である。可変遅延時間計算機 13 a に、荷電粒子の種類に関する情報、磁場励磁パターン 15 を基に計算される可変遅延時間 13 の定義式を格納することにより、可変遅延時間 13 をリアルタイムで計算することができる。

【0079】

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 9 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速度は荷電粒子の質量に依存する。従って、可変遅延時間 13 の変化は荷電粒子の速度に依存するため、荷電粒子の種類に関する情報を予め与えておく。

【0080】

また、荷電粒子の種類、磁場励磁パターン 15 が予め定まっているときは、可変遅延時間 13 を定義式にしたがって予め計算し、必要な可変遅延時間パターン (図 7) として格納してもよい。

【0081】

なお、可変遅延時間 13 をバンチ 3 の周回ごとに、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を構成する偏向電磁石 13 j からその時の磁場強度をビーム偏向磁場強度シグナル 13 k として、可変遅延時間計算機 13 a が受けて、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 13 をバンチ 3 の周回ごとに計算することもできる。

【0082】

また、バンチ 3 の周回速度を測定する速度モニター 13 h を使用し、式 (3) の $(t) \cdot c$ に相当する速度シグナル 13 i を直接可変遅延時間計算機 13 a にリアルタイムで与えれば、上述の式 (1)、及び式 (2) 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 13 を計算することもできる。

【0083】

リアルタイムで可変遅延時間 13 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 c、バンクコンデンサー 11 等に起因して、印加する加速電圧値 9 k 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、荷電粒子ビームの周回速度に突

発的な変化が起こった場合であっても、加速電圧 9 a の発生タイミングを補正することが可能となり、的確に加速電圧 9 a をパンチ 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。

【0084】

上述のようにして、計算または予め与えられた可変遅延時間 1 3 は、デジタルデータである可変遅延時間シグナル 1 3 b として、可変遅延時間発生器 1 3 c に出力される。

【0085】

可変遅延時間発生器 1 3 c は、ある周波数を基準とするカウンターで、通過シグナル 7 a をデジタル信号処理装置 8 d 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。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 1 3 c に、可変遅延時間 1 3 に相当する数値を入力することで、可変遅延時間 1 3 の長さの制御を行うことができる。

【0086】

具体的には、可変遅延時間発生器 1 3 c は、パンチモニター 7 からの通過シグナル 7 a、及び前記可変遅延時間計算機 1 3 a によって出力された可変遅延時間 1 3 に相当する数値である可変遅延時間シグナル 1 3 b を基に、パンチモニター 7 を通過したパンチ 3 ごとに、次回の加速用の誘導電圧 9 を発生させるタイミングを計算して、オンオフ選択器 1 3 e に可変遅延時間 1 3 の情報であるパルス 1 3 d を出力する。

【0087】

例えば、可変遅延時間計算機 1 3 a によって、150 という数値の可変遅延時間シグナル 1 3 b を上記 1 kHz のカウンターである可変遅延時間発生器 1 3 c に出力した場合、可変遅延時間発生器 1 3 c は、パンチモニター 7 からの通過シグナル 7 a を受けてから、0.15 秒後にパルス 1 3 d を発生する。

【0088】

ここで通過シグナル 7 a とは、パンチ 3 がパンチモニター 7 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。前記通過シグナル 7 a を得るためのパンチモニター 7 は、従来から高周波シンクロトロン 2 1 に使用されている陽子の通過を感知するモニターでよい。

【0089】

前記通過シグナル 7 a は、デジタル信号処理装置 8 d 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 a での位置が求められる。すなわち、通過シグナル 7 a は、可変遅延時間 1 3 の開始時間の基準である。

【0090】

オンオフ選択器 1 3 e は、加速用の誘導電圧 9 を発生（オン）させるか、発生させない（オフ）か決定する装置である。

【0091】

例えば、ある瞬間に必要な加速電圧値 9 k が 0.5 kV である場合、1 = パルス 1 3 f を発生させる、0 = パルス 1 3 f を発生させないと定義し、1.0 kV の一定値の加速電圧 9 a を用いて、パンチ 3 が 10 周回する間に、パンチ 3 の周回ごとに加速電圧 9 a を印加する、しないを、[1, 0, ..., 0, 1]（1 が 5 回、0 が 5 回）とすると、パンチ 3 が 10 周回の間に受けた平均的な加速電圧値 9 h は 0.5 kV となる。このようにして、オンオフ選択器 1 3 e が加速電圧 9 a をデジタル制御する。

【0092】

ある時間に必要な加速電圧値 9 k は、荷電粒子の種類、磁場励磁パターン 1 5 が予め定まっているときは、磁場励磁パターン 1 5 から予め計算される理想的な加速電圧値パターン（図 6）に対応する等価的な加速電圧値パターン（図 6）として与えることができる。

【0093】

10

20

30

40

50

等価的な加速電圧値パターン(図6)とは、例えば、1秒間に加速電圧値9kを0V~1kVまで変化させ、0.1秒間隔で制御する場合、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。

【0094】

また、ある時間に必要な加速電圧値9kは、バンチ3の周回ごとに、リアルタイムで計算することも可能である。ある時間に必要な加速電圧値9k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を構成する偏向電磁石13jからその時の磁場強度をビーム偏向磁場強度シグナル13kとして受けて、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。

【0095】

そして、オンオフ選択器13eは、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9kを基にして決定された、ゲート親信号8cの発生を制御するパルス13fをゲート親信号出力器13gに出力する。

【0096】

ゲート親信号出力器13gは、デジタル信号処理装置8dを通過した可変遅延時間13と加速用の誘導電圧9のオンオフの両方の情報を含んだパルス13fをパターン生成器8bに伝達するためのパルス、すなわちゲート親信号8cを発生させる装置である。

【0097】

ゲート親信号出力器13gから出力されるゲート親信号8cであるパルスの立ち上がり、加速用の誘導電圧9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13gは、オンオフ選択器13eから出力されるパルス13fを、パターン生成器8b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。

【0098】

ゲート親信号8cは、通過シグナル7aと同様に、荷電粒子ビームと加速電圧9aのタイミングを合わせるための可変遅延時間13を経過した瞬間にゲート親信号出力器13g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8bはゲート親信号8c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。

【0099】

上述のようにしてなるデジタル信号処理装置8d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7からの通過シグナル7aを基準に、スイッチング電源5bの駆動を制御するゲート信号パターン8aの基となるゲート親信号8cをパターン生成器8bに出力する。つまりデジタル信号処理装置8dが加速用の誘導電圧9のオンオフを制御しているといえる。

【0100】

特に、リアルタイムで可変遅延時間13、必要な加速電圧値9kを計算することにより、何ら設定を変更することなく、偏向電磁石13jの磁場励磁パターン15を基に、荷電粒子ビームの周回周波数に同期した加速電圧9aを印加することが可能となる。

【0101】

また、可変遅延時間13を予め計算する場合には、可変遅延時間計算機13aの中の理想的な可変遅延時間パターン(図7)に対応する必要な可変遅延時間パターン(図7)、オンオフ選択器13eの中の等価的な加速電圧値パターンを、選択した荷電粒子、磁場励磁パターン15に則した計算結果に書き換えるだけで、荷電粒子ビームと加速用の誘導電圧9の発生タイミングを常に合わせることができる。従って、効率的に任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルまで加速することが可能となる。

【0102】

図5は遅い繰り返しと加速電圧の関係を示す図である。横軸t(s)は実験用のシンクロトロン1の運転時間であり、単位は秒である。第1縦軸Bは実験用のシンクロトロン1を構成する偏向電磁石13jの磁場強度である。第2縦軸vは誘導電圧値である。なお、

10

20

30

40

50

これは、KEKの12 GeV PSによる陽子の加速パターンの1つである。

【0103】

遅い繰り返しとは、陽子ビームを前段加速器から入射14aした時間から開始し、加速を経て、出射14bし、さらに次の入射14aができるまでの時間である1周期14が約数秒程度の遅い繰り返しの磁場励磁パターン15による加速のことをいう。

【0104】

この磁場励磁パターン15は、陽子ビームが入射14aされた直後から、磁場強度を徐々に高め、出射14bの時点で最大磁場励磁状態になる。このとき陽子ビームの加速に使える加速時間14c、すなわち入射14aから加速終了14dまでにおいて、磁場強度は大きく変化する。

10

【0105】

特に、陽子ビームの入射14aの直後から、磁場強度は二次関数的に増加する。この時間帯の磁場励磁パターン15を非線形励磁領域15aという。これは偏向電磁石13jで発生させる磁場の変化が時間的に連続である要請に起因している。

【0106】

その後、加速終了14dまでは、磁場強度は時間に関して、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15を線形励磁領域15bという。

【0107】

従って、荷電粒子ビームを加速するには、この磁場強度の変化に同期して、誘導電圧を発生させる必要がある。そのときの磁場励磁パターン15に同期して必要となる加速電圧値(Vacc)(以下、理想的な加速電圧値パターン9cという。)は、次式(7)に示す関係がある。

20

【0108】

$$V_{acc} = d B / d t \cdots \text{式(7)}$$

すなわち、ある時間での必要な加速電圧値9kは、当該時間での磁場励磁パターン15の時間変化率に比例するものである。

【0109】

よって、非線形励磁領域15aでは、磁場強度が二次関数的に増加していることから、必要となる加速電圧値9iは、加速時間14cの時間変化の一次に比例して変化することとなる。

30

【0110】

一方、線形励磁領域15bでの必要な加速電圧値9jは、加速時間14cの変化に関係なく一定である。なお、先の特許文献2の内容は、この線形励磁領域15bにおいて、一定間隔で印加する、一定値の加速電圧9aによって、陽子ビームを加速できることを報告したものである。

【0111】

また、加速電圧9aは上述したように、印加し続けることはできないため、加速電圧9aを印加した次回は、リセット電圧9bを印加しなければならないのは勿論である。ここでは、理想的な加速電圧値パターン9cと異極のリセット電圧9bの集まりを理想的なリセット電圧値パターン9dという。

40

【0112】

従って、加速電圧9aをこの非線形励磁領域15aの磁場励磁パターン15に同期するためには、加速電圧値9iを時間変化とともに増加させることが必要である。

【0113】

しかし、加速用誘導加速セル6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9iは一定でしか得られない。一方、加速用誘導加速セル6で発生させるバンクコンデンサー11の充電電圧を制御することにより加速電圧値9iを変化することも考えられるが、バンクコンデンサー11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11の充電電圧を変化させる方法は、加速電圧値9iを速やかに制御する目的には使用できない。

50

【0114】

そこで、誘導電圧制御装置 8 を用いて、加速電圧 9 a の発生タイミングを非線形励磁領域 15 a に同期させることとした。

【0115】

図 6 は等価的な加速電圧値をパルス密度変化によって制御する方法を示す図である。図 6 (A) は、図 5 の加速時間 14 c の一部を拡大した図である。また、記号の意味は、図 5 と同じである。

【0116】

図 6 (B) は、図 6 (A) における線形励磁領域 15 b での一定のパンチ 3 の周回回数における加速用の誘導電圧 9 の発生タイミング群 (以下、パルス密度 17 という。) を示したものである。図 6 (C) は、図 6 (A) における非線形励磁領域 15 a でのパルス密度 17 を示したものである。

10

【0117】

大きく変化する磁場励磁パターン 15 に同期させ、陽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 15 b で必要な加速電圧値 9 j を印加できる加速用誘導加速セル 6 によって、陽子ビームの周回ごとに一定電圧値である加速電圧 9 a を印加できることが必要である。

【0118】

例えば、線形励磁領域 15 b で式 (7) の関係から必要な加速電圧値 9 j が 4 . 7 k V であるとする、4 . 7 k V 以上の加速電圧 9 a を印加できる加速用誘導加速セル 6 が必要である。そのときのパルス密度 17 を図 6 (B) に示す。

20

【0119】

図 6 (B) は、図 6 (A) の線形励磁領域 15 b での必要な加速電圧値 9 j が 4 . 7 k V であるから、4 . 7 k V の加速電圧 9 a をパンチ 3 の周回ごとに印加するとともに、リセット電圧 9 b を印加するように調整することを示している。このようなパルス密度 17 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、制御単位 15 c という。

【0120】

次に、非線形励磁領域 15 a に同期するため理想的な加速電圧値パターン 9 c をパンチ 3 に与えることが必要になる。それには一定値の加速電圧 9 a しか印加できない加速用誘導加速セル 6 であっても、加速電圧 9 a の印加回数を制御単位 15 c において調整することで、理想的な加速電圧値パターン 9 c と等価な加速電圧値 9 k を与えることが可能になる。

30

【0121】

すなわち、制御単位 15 c における加速電圧 9 a の印加回数を 0 から、パンチ 3 の周回ごとに印加するよう、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 9 c と一定時間においては、等価な加速電圧値 9 k を与えることができる。この等価な加速電圧値 9 k の集まりを等価的な加速電圧値パターン 9 e という。

【0122】

例えば、非線形励磁領域 15 a での必要な加速電圧値 9 i の最大値が 4 . 7 k V、加速電圧 9 a の制御単位 15 c が 10 周回であるとする、加速電圧値 9 k を 0 k V ~ 4 . 7 k V まで、0 . 47 k V 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 15 a での等価的な加速電圧値 9 k は 10 段階に分割できることとなる。そのときのパルス密度 17 を図 6 (C) に示す。

40

【0123】

図 6 (c) は、非線形励磁領域 15 a において、等価的な加速電圧値 9 k が 0 . 97 k V である場合のパルス密度 17 の制御方法の一例を示したものである。制御単位 15 c のパンチ 3 の周回回数を 10 とすると、10 周回の内の任意の 2 周回に 4 . 7 k V の一定値の加速電圧 9 a を印加する。

【0124】

具体的には図 6 (C) の実線で示した加速電圧 9 a、リセット電圧 9 b を発生させれば

50

よい。その方法は、点線で示した加速電圧 9 f、リセット電圧 9 g の印加をリアルタイムで停止することで可能である。

【0125】

このような加速電圧 9 a の印加制御を行うことにより、必要な加速電圧値 9 i である 0 . 9 7 k V を印加したことになる。なお、加速電圧 9 a の次には、リセット電圧 9 b が必要なのは当然である。

【0126】

また、0 . 4 7 k V よりさらに小さい加速電圧値 9 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 9 a の印加回数の比を調整すればよい。例えば、加速電圧値 9 i として 0 . 0 9 3 k v を必要とする場合は、バンチ 3 の 1 0 0 周回ごとに 2 回加速電圧 9 a を印加すればよい。

10

【0127】

ここで、非線形励磁領域 1 5 a が 0 . 1 秒間あるとすると、制御単位 1 5 c を 1 0 と設定した場合の各段階の時間は、0 . 0 1 秒となる。

【0128】

すなわち、パルス密度 1 7 の制御による加速電圧値 9 i の調整は、バンチモニター 7 からの通過シグナル 7 a を基に、デジタル信号処理装置 8 d、パターン生成器 8 b からなる誘導電圧制御装置 8 でゲート信号パターン 8 a の生成を停止する制御を行うことで可能である。

【0129】

なお、制御単位 1 5 c の間にバンチ 3 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 6 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 1 5 c の加速電圧 9 a の印加回数 (N o n) と加速電圧 9 a がオフの回数 (N o f f) から、次式 (8) によって求められる。

20

$$V a v e = V_0 \cdot N o n / (N o n + N o f f) \cdot \cdot \cdot \text{式 (8)}$$

【0130】

つまり、本発明である誘導電圧制御装置 8 によって、上述のような方法によって、制御単位 1 5 c のパルス密度 1 7 を調整し、ほぼ一定の電圧値 (V 0) の加速電圧 9 a しか印加することができない加速用誘導加速セル 6 であっても、遅い繰り返しの磁場励磁パターン 1 5 に同期して、加速電圧 9 a を陽子ビームに印加することが可能となる。

30

【0131】

図 7 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 7 (A) は、陽子ビームのエネルギーレベルと可変遅延時間 1 3 の関係を示している。なお、K E K の 1 2 G e V P S に本発明である誘導電圧制御装置 8 を組み込み、実験用のシンクロトロン 1 に陽子ビームを入射 1 4 a したときの値である。

【0132】

横軸 M e V 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 M e V は、 $1 . 6 0 2 \times 1 0^{-13}$ ジュールに相当する。縦軸 t (μs) は、可変遅延時間 1 3 であり、単位はマイクロ秒である。

【0133】

図 7 (A) のグラフは、理想的な可変遅延時間パターン 1 6 と、理想的な可変遅延時間パターン 1 6 に対応する必要な可変遅延時間パターン 1 6 a である。

40

【0134】

理想的な可変遅延時間パターン 1 6 とは、陽子ビームの周回速度の変化に合わせて、加速電圧 9 a を印加するために、陽子ビームの周回ごとに調節されたとしたならば、バンチ 3 がバンチモニター 7 を通過した時間から、デジタル信号処理装置 8 d がゲート親信号 8 c 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 1 3 のことをいう。

【0135】

必要な可変遅延時間パターン 1 6 a とは、理想的には、荷電粒子ビームの周回ごとに、

50

可変遅延時間 13 を制御することが望ましいが、可変遅延時間発生器 13 c の可変遅延時間 13 に対応したパルス 13 d の制御精度が $\pm 0.01 \mu\text{s}$ であること、バンチ 3 の周回ごとに可変遅延時間 13 を制御しなくとも、加速電圧 9 a の印加時間に時間的な幅があるため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 16 と同様に、加速電圧 9 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 13 のことをいう。

【0136】

従って、可変遅延時間 13 は、一定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 16 b という。ここでは、 $0.1 \mu\text{s}$ である。

【0137】

図 7 (A) のグラフより、KEK の 12 GeV PS での加速において、エネルギーレベルの低い入射 14 a の直後の陽子ビームに加速電圧 9 の発生タイミングを合わせる理想的な可変遅延時間 13 は、約 $1.0 \mu\text{s}$ の長さを必要とする。

【0138】

さらに、陽子ビームは加速時間 14 c の経過とともに、エネルギーレベルが増加し、それに伴って、可変遅延時間 13 も短くなる。特に、約 4500 MeV から加速終了 14 d までの間の必要な可変遅延時間パターン 16 a は、ほぼ 0 に近い値であることが分かる。

【0139】

図 7 (B) は加速時間 14 c の経過とともに、デジタル信号処理装置 8 d で計算され、出力されるゲート親信号 8 c の出力までに要する時間が短くなっている様子を示している。横軸 $t (\mu\text{s})$ は可変遅延時間 13 であり、単位はマイクロ秒である。なお、横軸 $t (\mu\text{s})$ は、図 7 (A) の縦軸に対応する。

【0140】

例えば、入射 14 a の直後に $1.0 \mu\text{s}$ の可変遅延時間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、 $0.2 \mu\text{s}$ の可変遅延時間 13 でよい。

【0141】

バンチモニター 7 より得られる通過シグナル 7 a を基準に、デジタル信号処理装置 8 d によって、ゲート親信号 8 c の出力までに要する時間を制御することによって、すなわち可変遅延時間 13 を制御することによって、入射 14 a 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加速電圧 9 a を印加することが可能になる。

【0142】

図 8 はパルス密度変化による加速電圧値の制御方法を例示した図である。記号 t および v の意味は、図 6 と同じである。 t_1 は非線形励磁領域 15 a の制御単位 15 c が 10 数回であるときの制御単位 15 c に要する時間を意味する。 t_2 は線形励磁領域 15 b の制御単位 15 c が 10 数回であるときの制御単位 15 c に要する時間を意味する。

【0143】

点線で示した加速電圧 9 f は、バンチ 3 が加速用誘導加速セル 6 に到達しても、印加されない加速電圧であることを意味する。同様に点線で示したリセット電圧 9 g も印加されないリセット電圧であることを意味する。

【0144】

v_1 は、 t_1 の間にバンチ 3 に印加された平均的な加速電圧値 9 h である。 v_1 は、 t_1 の間、すなわちバンチ 3 が 10 回加速用誘導加速セル 6 を通過する内の 7 回の通過に対して、一定電圧値 v_0 の加速電圧 9 a を印加していることから、 $v_1 = 7 / 10 \cdot v_0 = 0.7 v_0$ として計算できる。リセット電圧 9 b においても同様である。

【0145】

当然に、線形励磁領域 15 b で要求される一定値である理想的な加速電圧値 9 j を与えることも可能である。その場合の平均的な加速電圧値 9 h である v_2 は、 t_2 の間、加速用誘導加速セル 6 を通過するバンチ 3 に対して、每周回、一定電圧 v_0 の加速電圧 9 a を印加することから、 $v_2 = 10 / 10 \cdot v_0 = v_0$ である。

10

20

30

40

50

【0146】

さらに、連続して印加する加速電圧 9 a と加速電圧 9 a の時間間隔（以下、パルス間隔 1 7 a という。）は、必要な可変遅延時間パターン 1 6 a にしたがうことで、必然的にバンチ 3 の周回時間 2 4 の短縮に対応することができる。

【0147】

このようにパルス密度 1 7 を誘導電圧制御装置 8 で制御することで、一定電圧値の加速電圧 9 a のみしか印加できない加速用誘導加速セル 6 によっても、理想的な加速電圧値パターン 9 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 9 e を与えることで、大きく変動する非線形励磁領域 1 5 a の磁場励磁パターン 1 5 に同期することが可能になった。

【0148】

従って、本発明である誘導電圧制御装置 8 によって、加速用の誘導電圧 9 のパルス密度 1 7 を制御することで、あらゆる磁場励磁パターンに対応し、任意の荷電粒子を任意エネルギーレベルに加速することが可能になる。

【0149】

図 9 はパルス密度 1 7 の変化による加速制御の実験原理を説明する図である。なお、横軸 t は高周波加速空洞 4 内の時間的变化であり、縦軸 V (R F) は高周波加速電圧値 2 1 b である。

【0150】

以下、本発明である誘導電圧制御装置 8 によるパルス密度 1 7 の制御によって、陽子ビームの加速が可能か、KEK の 1 2 G e V P S に加速用誘導加速セル 6 を組み込んだ融合型の実験用のシンクロトロン 1 を用いて確認したときの実験原理について説明する。

【0151】

実験原理は、加速電圧 9 a と高周波加速空洞 4 による高周波 4 a を併用し、間接的に加速用誘導加速セル 6 によって印加される加速電圧 9 a が磁場励磁パターン 1 5 に同期しているか調べる方法を採用した。

【0152】

本実験で使用した高周波加速空洞 4 は、加速用誘導加速セル 6 で印加される加速電圧 9 a が磁場励磁パターン 1 5 に同期して、バンチ 3 に等価的な加速電圧値 9 k を印加することができていた場合、バンチ中心 3 c に印加される高周波加速電圧値 2 1 b を 0 にするよう高周波加速電圧 2 1 a の位相を自動制御できる装置である。

【0153】

高周波加速電圧 2 1 a の位相を自動制御するとは、加速用誘導加速セル 6 から印加される加速電圧 9 a が、磁場励磁パターン 1 5 に基づく理想的な加速電圧値パターン 9 c を超えてバンチ 3 に印加された場合には、バンチ 3 に負の電圧 4 e を印加する減速方向 4 g に位相を移動させ、一方、加速電圧 9 a が磁場励磁パターン 1 5 に基づく理想的な加速電圧値パターン 9 c に対して過小であった場合には、正の電圧 4 d を印加する加速方向 4 f に位相を移動させることである。

【0154】

高周波加速電圧 2 1 a の位相がどのように制御されているかを確認するために、バンチ中心 3 c の高周波加速電圧値 2 1 b を測定した。その結果、バンチ中心 3 c の高周波加速電圧値 2 1 b が 0 である場合は、加速用の誘導電圧 9 が磁場励磁パターン 1 5 に同期しており、誘導電圧制御装置 8 によるパルス密度 1 7 の制御が適正であると評価できることとなる。

【0155】

一方、バンチ中心 3 c の高周波加速電圧 2 1 a が正の電圧 4 d である場合は、理想的な加速電圧値パターン 9 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 9 e に対して加速電圧 9 a が過小であるため、正の電圧 4 d がバンチ中心 3 c に印加されるように高周波 4 a の位相を加速方向 4 f である高周波 4 b の位置に移動させ、磁場励磁パターン 1 5 に同期させており、誘導電圧制御装置 8 によるパルス密度 1 7 の制御が適正でないと評価できる。

【0156】

10

20

30

40

50

また、バンチ中心 3 c の高周波加速電圧 2 1 a が負の電圧 4 e である場合にも、理想的な加速電圧値パターン 9 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 9 e に対して加速電圧 9 a が過剰であるため、負の電圧 4 e がバンチ中心 3 c に印加されるように高周波 4 a の位相を減速方向 4 g である高周波 4 c の位置に移動させ、磁場励磁パターン 1 5 に同期させており、誘導電圧制御装置 8 によるパルス密度 1 7 の制御が適正でないと評価できる。

【 0 1 5 7 】

従って、バンチ中心 3 c の高周波電圧値を測定することで、磁場励磁パターン 1 5 に同期した加速電圧 9 a を印加するため、誘導電圧制御装置 8 によるパルス密度 1 7 の制御が適性になされていたか知ることができる。

【 0 1 5 8 】

図 1 0 は実験結果を示す図である。図 1 の改変した K E K の 1 2 G e V P S である実験用のシンクロトロン 1 を用いて陽子ビームを加速したときの高周波電圧値を測定した結果である。

【 0 1 5 9 】

グラフの横軸 t (m s) は、陽子ビームが実験用のシンクロトロン 1 内に入射 1 4 a されたときを基準にした加速時間 1 4 c の経過であり、単位はミリ秒である。縦軸 v は、誘導電圧値である。

【 0 1 6 0 】

実験に利用した磁場励磁パターン 1 5 は、図 6 (A) に示す非線形励磁領域 1 5 a の特に理想的な加速電圧値 9 k の変化が著しい入射 1 4 a の直後 (0 から 1 0 0 m s) を選択した。

【 0 1 6 1 】

試験区 1 8 は、本発明の誘導電圧制御装置 8 によるパルス密度 1 7 の制御を、以下の条件で行ったときの結果である。

【 0 1 6 2 】

パルス密度 1 7 の制御単位 1 5 c は、バンチ 3 の周回回数 1 0 とした。従って、非線形励磁領域 1 5 a での等価的な加速電圧値パターンは、1 0 段階に分割できる。その分割された一定時間は、1 0 m s となる。つまり、図 6 (A) に示す等価的な加速電圧値パターン 9 e と同じである。

【 0 1 6 3 】

必要な可変遅延時間パターンは、図 7 (A) に示す理想的な可変遅延時間パターン 1 6 に対応する必要な可変遅延時間パターン 1 6 a を用いた。そのときの制御時間単位 1 6 b は、0 . 1 マイクロ秒である。

【 0 1 6 4 】

比較例 (1) 1 8 a は、加速用誘導加速セル 6 によって加速電圧 9 a を印加せず、高周波加速電圧 2 1 a のみによる加速を行ったときの結果である。この比較例 (1) 1 8 a の結果は、非線形励磁領域 1 5 a の実験領域の理想的な加速電圧値パターン 9 c を意味する。非線形励磁領域 1 5 a での最大加速電圧値 9 i は線形励磁領域 1 5 b の加速電圧値 9 j と同じ値になり、この場合 4 . 7 k V である。従ってリセット電圧 9 b の値は - 4 . 7 k V である。

【 0 1 6 5 】

比較例 (2) 1 8 b は、パルス密度 1 7 の制御することなく、バンチ 3 の周回ごとに一定電圧の加速電圧 9 a を印加したときの結果である。

【 0 1 6 6 】

なお、完全に加速用誘導加速セル 6 によって印加された加速電圧 9 a が、磁場励磁パターン 1 5 に同期している場合は縦軸の 0 の位置にグラフが描かれる。

【 0 1 6 7 】

図 1 0 の実験結果について説明する。試験区 1 8 では高周波加速空洞 4 によって、バンチ中心 3 c に印加された高周波加速電圧値 2 1 b は、ほぼ 0 k V であった。

【 0 1 6 8 】

10

20

30

40

50

従って、試験区 18 の結果から、本発明である誘導電圧制御装置 8 によって、パルス密度 17 を制御することで、非線形励磁領域 15 a においても加速用の誘導電圧 9 によって、陽子ビームを加速できることが確かめられた。

【0169】

一方、比較例(2)18 b は、本発明である誘導電圧制御装置 8 によって、パルス密度 17 を制御することなく(等価的な加速電圧値パターン 9 e にしたがわないが、必要な可変遅延時間パターン 16 a による制御は当然に行っている)、バンチ 3 の通過ごとに、4.7 kV の加速電圧 9 a を印加していた。

【0170】

よって、比較例(2)18 b の入射 14 a の直後においては、加速用誘導加速セル 6 によって過剰に印加された加速電圧 9 a からバンチ 3 が受けたエネルギーを減じ、磁場励磁パターン 15 に同期させるため、高周波 4 a が減速方向 4 g に位相を移動させ、約 -4.7 kV の負の電圧 4 e が印加されていた。

【0171】

また、加速時間 14 c の経過とともに、磁場励磁パターン 15 に同期させるための理想的な加速電圧値パターン 9 c も、加速用誘導加速セル 6 によって印加される 4.7 kV の加速電圧 9 a に近づくため、高周波加速空洞 4 によって印加される高周波加速電圧 21 a の負の電圧 4 e が減少し、最終的に高周波加速空洞 4 によって印加させる高周波加速電圧値 21 b は、ほぼ 0 kV になった。

【0172】

従って、比較例(2)18 b の結果から、パルス密度 17 を制御しなければ、非線形励磁領域 15 a において、一定電圧値の加速用の誘導電圧 9 のみでは陽子ビームを加速することができないことが確かめられた。

【0173】

以上、図 10 の結果から、本発明である誘導電圧制御装置 8 によって、パルス密度 17 を制御することで、陽子ビームを非線形励磁領域 15 a においても、加速用の誘導電圧 9 によって、加速できることが確かめられた。

【0174】

また、バンチ 3 の周回時間 24 は、加速時間 14 c の経過とともに徐々に短縮されることから、実験結果は徐々に短縮される周回時間 24 に同期して、加速電圧 9 a の発生タイミングを必要な可変遅延時間パターン 16 a により制御できたことも確かめられた。

【0175】

従って、予め必要な可変遅延時間パターン 16 a を、本発明である誘導電圧制御装置 8 の可変遅延時間計算機 13 a に与えることで、パルス密度 17 を制御し、非線形励磁領域 15 a の磁場励磁パターン 15 を基に計算できる理想的な加速電圧値パターン 9 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 9 e を陽子ビームに与えることができたといえる。

【0176】

つまり、陽子ビームが加速できることから、荷電粒子の種類や、磁場励磁パターン 15 が変更になったとしても、変更した必要な可変遅延時間パターンを可変遅延時間計算機 13 a に与えること、及び磁場励磁パターン 15 に基づく理想的な加速電圧値パターン 9 c に対応する等価的な加速電圧値パターン 9 e を、オンオフ選択器 13 e に与えることにより、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といえる。

【0177】

図 11 は図 10 の実験結果を加工した図である。図 10 では、10 分割された非線形領域での加速電圧値 9 i の変化が十分確認することができないため、図 10 で得られた結果を以下に示す方法により加工しグラフを作成した。なお、記号の意味は図 10 と同じである。

【0178】

検証(1)18 c は、比較例(1)18 a の高周波加速電圧値 21 b から試験区 18 の

10

20

30

40

50

高周波加速電圧値 2 1 b を引いた結果を表すグラフである。

【0 1 7 9】

一方、検証(2) 1 8 d は、比較例(2) 1 8 b の高周波加速電圧値 2 1 b から試験区 1 8 の高周波加速電圧値 2 1 b を引いた結果を表すグラフである。

【0 1 8 0】

上記加工により、測定過程におけるノイズの影響を取り除くことができる。なお、 $v = 0$ の位置がパルス密度 1 7 の制御を行った場合の結果に相当する。

【0 1 8 1】

図 1 1 の結果から、パンチ 3 の 1 0 周回ごとを制御単位 1 5 c としてパルス密度 1 7 を制御したことから、非線形励磁領域 1 5 a (0 から 1 0 0 m s) において、等価的な加速電圧値パターン 9 e に対応する、1 0 m s ごとの加速電圧値 9 i の上昇を確認できる。 10

【0 1 8 2】

図 1 2 は速い繰り返しと加速電圧値を示す図である。シンクロトロンの運転方式には、速い繰り返し方式と、遅い繰り返し方式がある。何れも荷電粒子ビームを加速する過程において時間的に変動する磁場励磁パターン 1 5、1 9 をもつ。

【0 1 8 3】

上述のように、一定値である加速電圧 9 a を用いて、遅い繰り返しの磁場励磁パターン 1 5 に同期して、任意の荷電粒子を任意のエネルギーレベルまで加速できることを説明したが、本発明である誘導電圧制御装置 8 及びその制御方法によれば、速い繰り返しの磁場励磁パターン 1 9 であっても、加速用の誘導電圧 9 を同期させることができる。 20

【0 1 8 4】

速い繰り返しとは、荷電粒子を前段加速器からの入射 1 4 a から開始し、加速を経て、出射 1 4 b し、さらに次回の入射 1 4 a ができるまでの時間である 1 周期 2 0 が約数十ミリ秒程度の速い繰り返しの磁場励磁パターン 1 9 による加速のことをいう。

【0 1 8 5】

第 1 縦軸 B は、誘導加速セルを用いたシンクロトロンの磁場強度で、第 2 縦軸 v は誘導電圧値である。第 1 横軸 t は、磁場励磁パターン 1 9 の時間的変化であり、第 2 横軸 t (v) は、加速用の誘導電圧 9 の発生時間であり、ともに荷電粒子ビームが誘導加速セルを用いたシンクロトロンに入射 1 4 a した時間を基準としている。

【0 1 8 6】

速い繰り返しの磁場励磁パターン 1 9 は、サインカーブの振幅を描くが、この磁場励磁パターン 1 9 に同期する加速用の誘導電圧 9 の値は、遅い繰り返しの磁場励磁パターン 1 5 から求めるのと同様に、前述の式(7)により計算される。 30

【0 1 8 7】

式(7)により計算された加速電圧値 9 k が、理想的な加速電圧値パターン 1 9 a である。理想的な加速電圧値パターン 1 9 a は、磁場励磁パターン 1 9 のある時間での磁場変化の時間微分に比例するため、理論的にはコサインカーブ形の加速電圧 9 k の変化が求められる。

【0 1 8 8】

当然に、理想的な加速電圧値パターン 1 9 a と逆向きの理想的なリセット電圧値パターン 1 9 c と等価的なリセット電圧 9 b を、荷電粒子ビームの存在しない時間帯に発生させなければならない。 40

【0 1 8 9】

この磁場励磁パターン 1 9 に同期し加速電圧 9 a を印加させるためには、遅い繰り返しの磁場励磁パターン 1 5 の場合に比べ要求される加速電圧値 9 k は、時間とともに著しく増減する。

【0 1 9 0】

しかし、本発明による誘導電圧制御装置 8 及びその制御方法により、等価的な加速電圧値パターン 1 9 b を用いて、複雑な加速電圧値 9 k の変化を伴う速い繰り返しの磁場励磁パターン 1 9 に問題無く同期して、加速電圧 9 a を十分高速、かつ正確に制御することが 50

できる。

【0191】

従って、あらゆる磁場励磁パターンにおいても、本発明である誘導電圧制御装置8及びその制御方法を用いて、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できるといえる。

【産業上の利用可能性】

【0192】

本発明である誘導電圧制御装置8は上記効果が得られることから、従来の高周波加速空洞4を用いた高周波シンクロトロン21を低コストで誘導加速セルを用いたシンクロトロンに改装することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0193】

【図1】本発明を含む実験用のシンクロトロンの概略図である。

【図2】加速用誘導加速装置の等価回路である。

【図3】可変遅延時間についての説明図である。

【図4】デジタル信号処理装置の構成図である。

【図5】遅い繰り返しと加速電圧の関係を示す図である。

【図6】等価的な加速電圧値をパルス密度変化によって制御する方法を示す図である。

【図7】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8】パルス密度変化による加速用の誘導電圧の制御方法を例示した図である。

20

【図9】パルス密度変化による加速制御の実験原理を説明する図である。

【図10】実験結果を示す図である。

【図11】実験結果を加工した図である。

【図12】速い繰り返しと等価的な加速電圧値の関係を示す図である。

【図13】高周波加速空洞による陽子ビームの加速原理を示す図である。

【図14】誘導加速セルによる陽子ビームの加速原理を示す図である。

【符号の説明】

【0194】

- 1 実験用のシンクロトロン
- 2 設計軌道
- 3 パンチ
- 3 a 進行軸方向
- 3 b スーパーパンチ
- 3 c パンチ中心
- 3 d 移動時間
- 4 高周波加速空洞
- 4 a 高周波
- 4 b 高周波
- 4 c 高周波
- 4 d 正の電圧
- 4 e 負の電圧
- 4 f 加速方向
- 4 g 減速方向
- 5 加速用誘導加速装置
- 5 a 伝送線
- 5 b スイッチング電源
- 5 c DC充電器
- 5 d 誘導電圧モニター
- 5 e 誘導電圧シグナル
- 6 加速用誘導加速セル

30

40

50

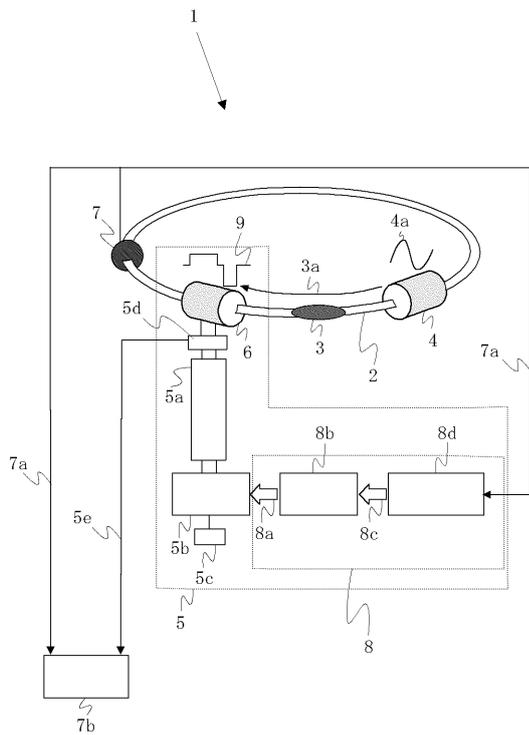
6 a	加速ギャップ	
7	バンチモニター	
7 a	通過シグナル	
7 b	オシロスコープ	
7 c	伝達時間	
7 d	伝達時間	
8	誘導電圧制御装置	
8 a	ゲート信号パターン	
8 b	パターン生成器	
8 c	ゲート親信号	10
8 d	デジタル信号処理装置	
9	加速用の誘導電圧	
9 a	加速電圧	
9 b	リセット電圧	
9 c	理想的な加速電圧値パターン	
9 d	理想的なリセット電圧値パターン	
9 e	等価的な加速電圧値パターン	
9 f	加速電圧	
9 g	リセット電圧	
9 h	平均的な加速電圧値	20
9 i	加速電圧値	
1 0	加速用誘導加速装置の等価回路	
1 1	バンクコンデンサー	
1 1 a	第 1 スイッチ	
1 1 b	第 2 スイッチ	
1 1 c	第 3 スイッチ	
1 1 d	第 4 スイッチ	
1 2	マッチング抵抗	
1 3	可変遅延時間	
1 3 a	可変遅延時間計算機	30
1 3 b	可変遅延時間シグナル	
1 3 c	可変遅延時間発生器	
1 3 d	パルス	
1 3 e	オンオフ選択器	
1 3 f	パルス	
1 3 g	ゲート親信号出力器	
1 3 h	速度モニター	
1 3 i	速度シグナル	
1 3 j	偏向電磁石	
1 3 k	ビーム偏向磁場強度シグナル	40
1 4	1 周期	
1 4 a	入射	
1 4 b	出射	
1 4 c	加速時間	
1 4 d	加速終了	
1 5	磁場励磁パターン	
1 5 a	非線形励磁領域	
1 5 b	線形励磁領域	
1 5 c	制御単位	
1 6	理想的な可変遅延時間パターン	50

- 1 6 a 必要な可変遅延時間パターン
- 1 6 b 制御時間単位
- 1 7 パルス密度
- 1 7 a パルス間隔
- 1 8 試験区
- 1 8 a 比較例 (1)
- 1 8 b 比較例 (2)
- 1 8 c 検証 (1)
- 1 8 d 検証 (2)
- 1 9 磁場励磁パターン
- 1 9 a 理想的な加速電圧値パターン
- 1 9 b 等価的な加速電圧値パターン
- 1 9 c 理想的なリセット電圧値パターン
- 2 0 1 周期
- 2 1 高周波シンクロトロン
- 2 1 a 高周波加速電圧
- 2 1 b 高周波加速電圧値
- 2 2 シンクロトロン
- 2 3 閉込用誘導加速セル
- 2 3 a 負のバリアー電圧
- 2 3 b 正のバリアー電圧
- 2 4 周回時間

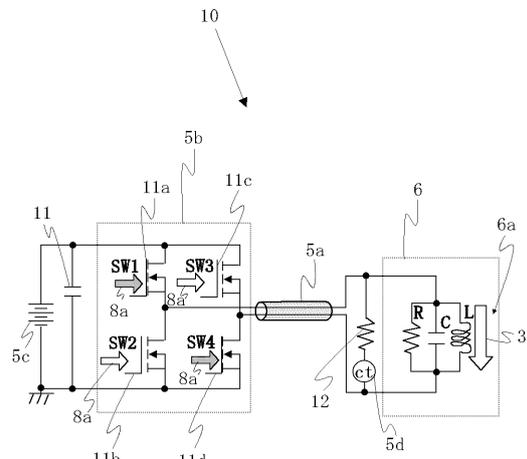
10

20

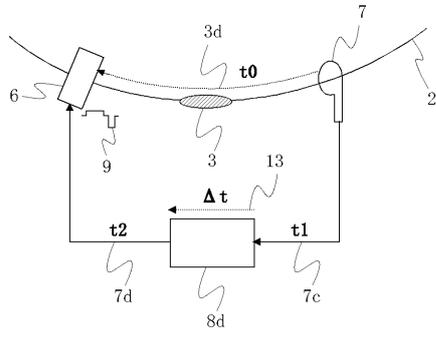
【 図 1 】



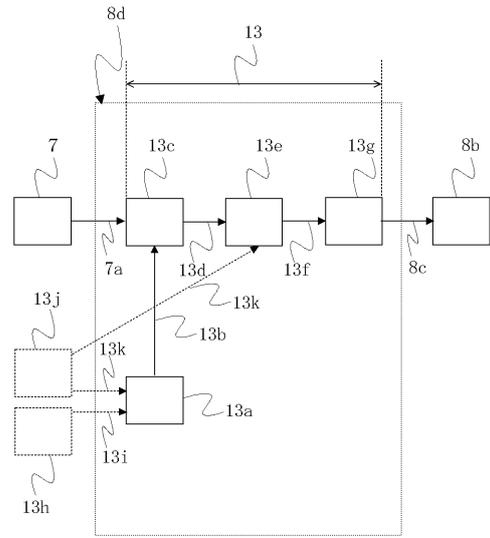
【 図 2 】



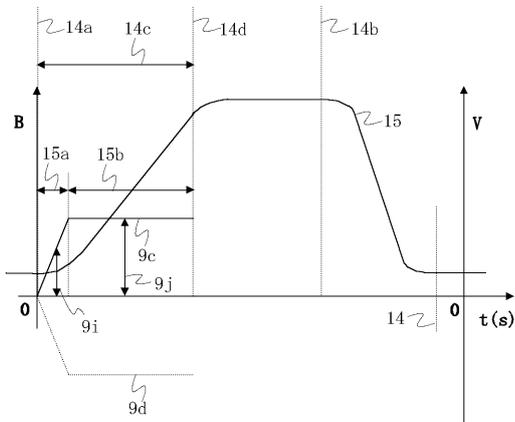
【 図 3 】



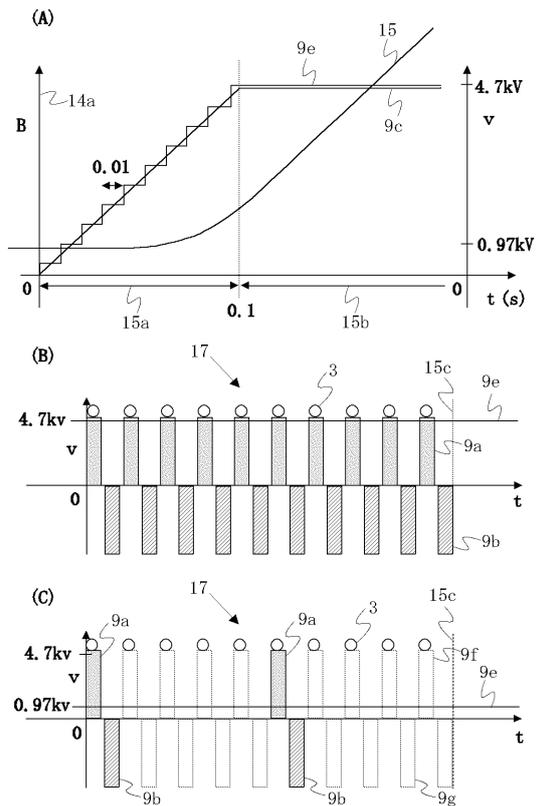
【 図 4 】



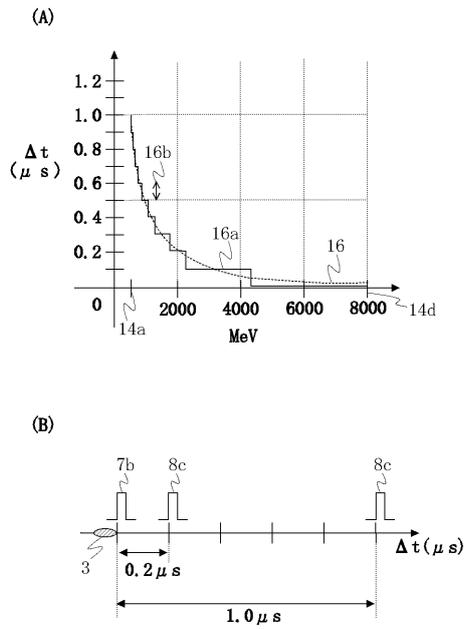
【 図 5 】



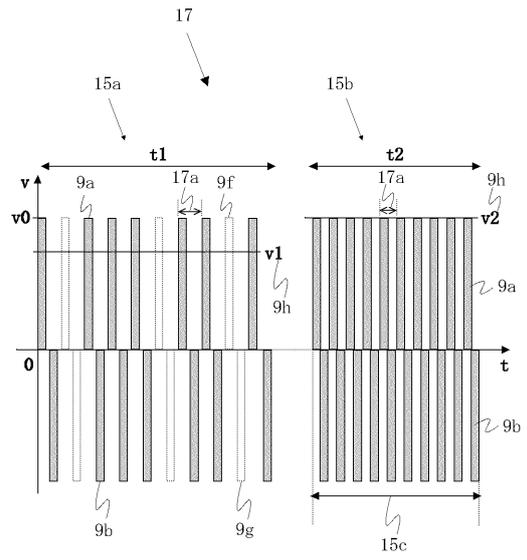
【 図 6 】



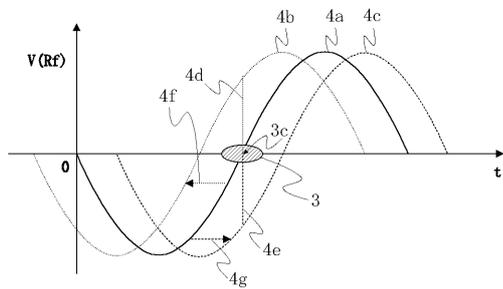
【 図 7 】



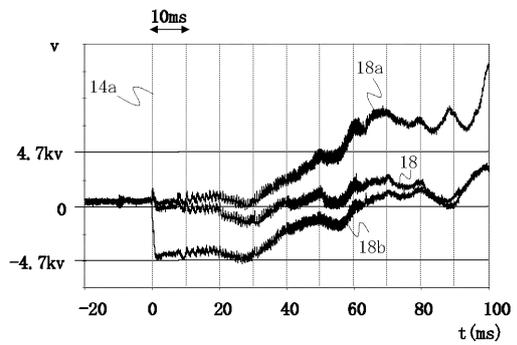
【 図 8 】



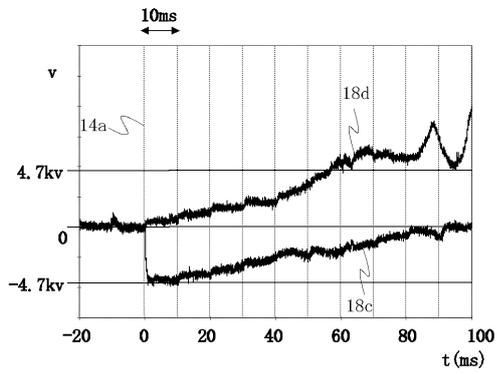
【 図 9 】



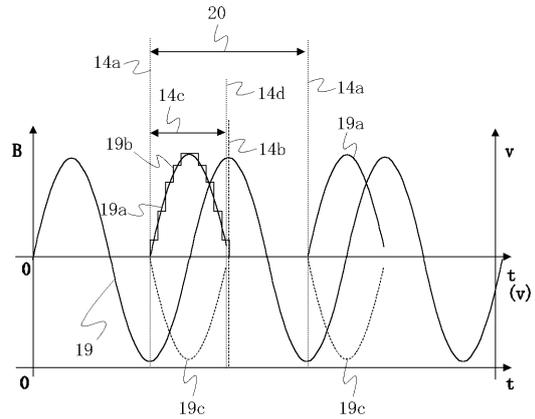
【 図 10 】



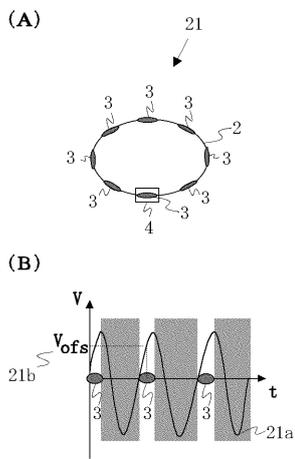
【 図 1 1 】



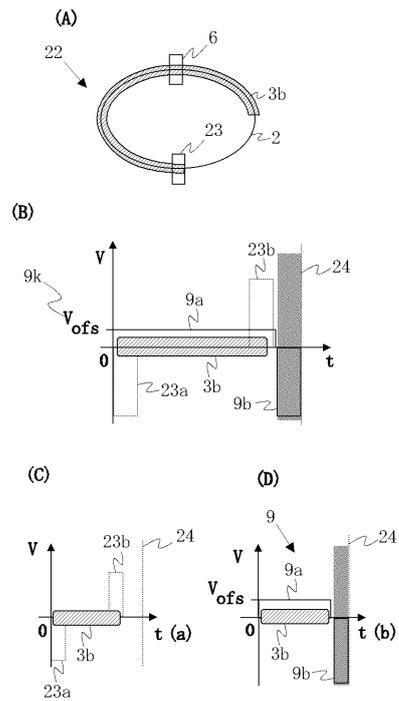
【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



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 CA05 CA24 CA26