

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5046928号
(P5046928)

(45) 発行日 平成24年10月10日(2012.10.10)

(24) 登録日 平成24年7月27日(2012.7.27)

(51) Int.Cl. F 1
H05H 13/02 (2006.01) H05H 13/02

請求項の数 25 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2007-522777 (P2007-522777)	(73) 特許権者	507020141
(86) (22) 出願日	平成17年7月21日(2005.7.21)		メヴィオン・メディカル・システムズ・インコーポレーテッド
(65) 公表番号	特表2008-507826 (P2008-507826A)		アメリカ合衆国, マサチューセッツ州
(43) 公表日	平成20年3月13日(2008.3.13)		1772, リトルトン, フォスター ストリート 300
(86) 国際出願番号	PCT/US2005/025965	(74) 代理人	100087941
(87) 国際公開番号	W02006/012467		弁理士 杉本 修司
(87) 国際公開日	平成18年2月2日(2006.2.2)	(74) 代理人	100086793
審査請求日	平成20年6月27日(2008.6.27)		弁理士 野田 雅士
(31) 優先権主張番号	60/590,089	(74) 代理人	100112829
(32) 優先日	平成16年7月21日(2004.7.21)		弁理士 堤 健郎
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 シンクロサイクロトロン及び粒子ビームを生成する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

磁界生成器と、
共振回路とを有し、
前記共振回路に電圧が入力されるシンクロサイクロトロンであって、
前記共振回路が、磁極の間に配置され、間に磁界が横切るすき間を有している電極と、
該電極を備える回路内の可変のリアクタンス素子であって、当該共振回路の共振周波数を変化させるためのリアクタンス素子とを有しており、
前記共振回路への入力電圧が、荷電粒子の加速の時間の中に前記入力電圧の周波数が変化させられる振動電圧であって、前記共振回路を駆動し、前記すき間を横切る振動電界を生成するシンクロサイクロトロン。

【請求項 2】

請求項 1 において、前記入力電圧の振幅が変化させられるシンクロサイクロトロン。

【請求項 3】

請求項 1 において、当該シンクロサイクロトロンに荷電粒子を注入するためのイオン源および前記磁極の間に配置されて当該シンクロサイクロトロンから粒子ビームを抽出する抽出電極をさらに備えているシンクロサイクロトロン。

【請求項 4】

請求項 1 において、前記共振回路の共振状態を検出するための 1 つ以上のセンサをさらに備えているシンクロサイクロトロン。

【請求項 5】

請求項 1 において、共振状態を維持するため、前記可変のリアクタンス素子のリアクタンスを制御して前記共振回路の共振周波数を調節するための手段をさらに備えているシンクロサイクロトロン。

【請求項 6】

請求項 5 において、粒子ビームを測定するためのビーム監視器をさらに備えており、前記入力電圧、前記イオン源、および前記抽出電極の少なくとも 1 つが、前記粒子ビームの変化を補償すべく制御されるシンクロサイクロトロン。

【請求項 7】

請求項 6 において、前記ビーム監視器が、粒子ビームの強度、粒子ビームのタイミングおよび粒子ビームの空間分布の 1 つ以上を測定するシンクロサイクロトロン。

10

【請求項 8】

請求項 1 において、前記振動入力電圧が、プログラマブル・デジタル波形生成器によって生成されるシンクロサイクロトロン。

【請求項 9】

請求項 8 において、前記プログラマブル・波形生成器が、前記粒子ビームの変化を補償すべく前記イオン源および前記抽出電極の少なくとも一方を制御するシンクロサイクロトロン。

【請求項 10】

磁界生成器と、
共振回路と、
前記共振回路に電圧がされるシンクロサイクロトロンであって、
前記共振回路が、磁極の間に配置され、間に磁界が横切るすき間を有している電極と、
該電極を備える回路内の可変のリアクタンス素子であって、当該共振回路の共振周波数を変化させるためのリアクタンス素子とを有しており、
前記共振回路への入力電圧が、プログラマブル・デジタル波形生成器によって荷電粒子の加速の時間の間に変化させられる振動電圧であって、前記共振回路を駆動し、前記すき間を横切る振動電界を生成するシンクロサイクロトロン。

20

【請求項 11】

シンクロサイクロトロンにおいて粒子ビームを生成する方法であって、
イオン源によって前記シンクロサイクロトロンへと荷電粒子を注入するステップと、
間に磁界が横切るすき間を持っている加速電極を備えている共振回路に、振動入力電圧を印加して前記共振回路を駆動し、前記すき間を横切る振動電界を生成して、前記荷電粒子を加速させるステップであって、前記振動入力電圧の周波数が前記荷電粒子の加速の時間の間に変化するように制御されているステップと、
前記加速させた荷電粒子を抽出電極によって抽出して粒子ビームを形成するステップと、
を含んでいる方法。

30

【請求項 12】

請求項 11 において、前記振動入力電圧の振幅が変化させられる方法。

40

【請求項 13】

請求項 11 において、前記共振回路の共振状態を検出するステップをさらに含んでいる方法。

【請求項 14】

請求項 13 において、前記入力電圧の周波数が、共振状態を維持するように調節される方法。

【請求項 15】

請求項 14 において、前記共振回路の共振状態を維持するため、前記振動入力電圧および前記加速電極を備える回路の可変のリアクタンス素子のリアクタンスを調節するステップをさらに含んでいる方法。

50

【請求項 16】

請求項 15 において、粒子ビームの強度をビーム監視器によって粒子ビームの強度、粒子ビームのタイミングおよび粒子ビームの空間分布の 1 つ以上を測定するステップと、
前記振動入力電圧、前記イオン源、および前記抽出電極のうちの少なくとも 1 つを制御して前記粒子ビームの変化を補償するステップと、
をさらに含んでいる方法。

【請求項 17】

請求項 16 において、前記振動入力電圧が、プログラマブル・デジタル波形生成器によって生成される方法。

【請求項 18】

請求項 17 において、前記プログラマブル・波形生成器が、前記粒子ビームの変化を補償すべく前記イオン源および前記抽出電極の少なくとも一方を制御する方法。

10

【請求項 19】

シンクロサイクロトロンにおいて粒子ビームを生成する方法であって、
イオン源によってシンクロサイクロトロンへと荷電粒子を注入するステップと、
間に磁界が横切るすき間を持つように加速電極を備えている共振回路に、振動入力電圧を印加して前記共振回路を駆動し、前記すき間を横切る振動電界を生成して、前記荷電粒子を加速させるステップであって、前記入力電圧がプログラマブル・デジタル波形生成器によって決定される可変の振幅および周波数を有しているステップと、
前記加速させた荷電粒子を抽出電極によって抽出して粒子ビームを形成するステップと、
を
含んでいる方法。

20

【請求項 20】

当該シンクロサイクロトロンに荷電粒子を注入するための注入手段と、
振動電界によって荷電粒子を加速させるための加速手段であって、該振動電界が荷電粒子の加速の時間の間に変化する加速手段と、
加速させた荷電粒子を抽出して粒子ビームを形成するための抽出手段と、
振動入力電圧が、間に磁界を横切るすき間を有している加速電極へと印加されて駆動され、前記すき間を横切る振動電界を生成する共振回路と、
を備え、
前記共振回路への入力電圧が、荷電粒子の加速の時間の間に前記入力電圧の周波数が変化させられる振動電圧であるシンクロサイクロトロン。

30

【請求項 21】

請求項 20 において、荷電粒子の加速の時間の間に前記振動入力電圧を変化させるための電圧制御手段をさらに備えているシンクロサイクロトロン。

【請求項 22】

請求項 21 において、粒子ビームを監視するための監視手段をさらに備えているシンクロサイクロトロン。

【請求項 23】

請求項 22 において、前記共振回路の共振周波数を変化させるため、共振周波数制御手段を前記振動入力電圧および前記加速電極を備える回路にさらに備えているシンクロサイクロトロン。

40

【請求項 24】

請求項 23 において、前記共振回路の共振状態を検出するための共振検出手段をさらに備えているシンクロサイクロトロン。

【請求項 25】

磁界生成器と、
共振回路とを有し、
前記共振回路に電圧が入力されるシンクロサイクロトロンであって、
前記共振回路が、磁極の間に配置され、間に磁界が横切るすき間を有している電極と、

50

該電極を備える回路内の可変のリアクタンス素子であって、当該共振回路の共振周波数を変化させるためのリアクタンス素子と、

荷電粒子の加速の時間の間に変化する振動電圧であって、前記共振回路を駆動し、前記すき間を横切る振動電界を生成する前記共振回路への入力電圧を変えるフィードバックシステムとを有しているシンクロサイクロトロン。

【発明の詳細な説明】

【関連出願】

【0001】

この出願は、2004年7月21日付の米国特許仮出願第60/590,089号の利益を主張する。上記出願の全ての説明は、ここでの言及によって本明細書に組み込まれたものとする。

10

【背景技術】

【0002】

1930年代以降、荷電粒子を高いエネルギーへと加速するために、多数の種類の子加速器が開発されてきている。粒子加速器の種類の一つは、サイクロトロンである。サイクロトロンは、真空チャンバ内の一つ以上の「ディー(D)」へ交流電圧を加えることによって、軸方向の磁界内の荷電粒子を加速する。「ディー」という呼び名は、初期のサイクロトロンの電極形状を描写したものであり、いくつかのサイクロトロンにおいては文字「D」に似ていないかもしれない。粒子を加速することによって生み出される螺旋状の経路は、磁界に対して直角である。粒子が螺旋状に飛び出すとき、加速電界がディー間のすき間へと加えられる。高周波(RF)電圧が、ディー間のすき間を横切って交流電界を生じさせる。高周波電圧、すなわち高周波電界は、粒子がすき間を繰り返し横切るときに高周波波形によって加速されるよう、磁界内の荷電粒子の周回運動の周期に同期させられる。粒子のエネルギーが、印加された高周波(RF)電圧のピーク電圧をはるかに超えるエネルギー・レベルへと高められる。荷電粒子が加速されるにつれ、それらの質量が、相対論的效果によって大きくなる。結果として、粒子の加速が不均一になり、粒子が、印加電圧のピークと同期せずすき間へと到着する。

20

【0003】

現在使用されている2種類のサイクロトロン、すなわちアイソクロナス・サイクロトロンおよびシンクロサイクロトロンが、加速された粒子の相対論的質量の増加という課題を、別々のやり方で克服している。アイソクロナス・サイクロトロンは、適切な加速を維持すべく半径とともに増加する磁界において電圧の周波数を維持するために、半径の増加とともに磁界を増加させる一定周波数電圧を用いている。シンクロサイクロトロンは、半径が増すにつれて減少する磁界を使用し、荷電粒子の相対論的速度によって引き起こされる質量の増加に釣り合うよう、加速電圧の周波数を変化させる。

30

【0004】

シンクロサイクロトロンにおいては、荷電粒子の不連続な「群(bunches)」が最終的なエネルギーへと加速され、その後サイクルが再び開始される。アイソクロナス・シンクロトロンにおいては、荷電粒子を、群にてではなく、連続的に加速させることができ、より高いビーム出力を達成できる。

40

【0005】

例えば陽子を250MeVのエネルギーまで加速させることができるシンクロサイクロトロンにおいて、陽子の最終的な速度は0.61c(ここで、cは光速)であり、質量の増加は、静止質量を超えること27%である。これに対応する量だけ周波数を減少させなければならず、さらに半径方向に減少する磁界の強度を補うべく周波数を減少させなければならない。周波数の時間に対する依存性が線形でなくなり、この依存性を説明する関数の最適な形状は、多数の細目に依存することになる。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

50

所望の最終エネルギーによって要求される範囲にわたる周波数の正確かつ再現性のある制御であって、相対論的な質量増加およびディーの中心からの距離に対する磁界の依存性の両者を補正する制御は、従来からの課題である。さらに、加速電圧の振幅を、合焦の維持およびビームの安定の向上のために、加速サイクルの間に変化させる必要があるかもしれない。さらに、ディーおよびサイクロトロンを構成している他のハードウェアが共振回路を構成しており、そこではディーを、キャパシタの電極とみなすことができるかもしれない。この共振回路がQ係数によって説明され、すき間を横切る電圧の形状に寄与する。

【課題を解決するための手段】

【0007】

陽子などの荷電粒子を加速するためのシンクロサイクロトロンは、磁界生成器と、磁極間に配置された電極を有する共振回路とを有することができる。電極間のすき間を、磁界を横切って配置することができる。振動入力電圧が、すき間を横切る振動電界を駆動する。振動入力電圧を、荷電粒子の加速の時間の間に変化するように制御することができる。振動入力電圧の振幅および周波数のいずれかまたは両者を、変化させることができる。振動入力電圧は、プログラマブル・(programmable) デジタル波形生成器によって生成することができる。

10

【0008】

さらに共振回路が、当該共振回路の共振周波数を変化させるため、前記入力電圧および電極を備える回路に可変のリアクタンス素子を備えることができる。この可変のリアクタンス素子は、回転コンデンサまたは振動リードなどといった可変のキャパシタンス素子であってよい。そのようなリアクタンス素子のリアクタンスを変化させて共振回路の共振周波数を調節することで、シンクロサイクロトロンの動作周波数の範囲にわたって共振状態を維持することができる。

20

【0009】

さらに、このシンクロサイクロトロンは、すき間を横切る振動電界を測定するための電圧センサを備えることができる。すき間を横切る振動電界を測定して、振動入力電圧と比較することによって、共振回路の共振状態を検出することができる。プログラマブル・波形生成器が、共振状態を維持するように電圧および周波数の入力を調節することができる。

【0010】

さらにシンクロサイクロトロンは、プログラマブル・デジタル波形生成器によって制御される電圧下にあり、磁極間に配置されている注入電極を備えることができる。注入電極は、荷電粒子をシンクロサイクロトロンへと注入するために使用される。さらにシンクロサイクロトロンは、プログラマブル・デジタル波形生成器によって制御される電圧下にあり、磁極間に配置されている抽出電極を備えることができる。抽出電極は、シンクロサイクロトロンから粒子ビームを抽出するために使用される。

30

【0011】

さらにシンクロサイクロトロンは、粒子ビームの特性を測定するためのビーム監視器を備えることができる。例えば、ビーム監視器は、粒子ビームの強度、粒子ビームのタイミング、または粒子ビームの空間分布を測定することができる。プログラマブル・波形生成器が、粒子ビームの特性の変化を補償するために、入力電圧、注入電極の電圧、および抽出電極の電圧のうちの少なくとも1つを調節することができる。

40

【0012】

本発明は、効果的な荷電粒子の加速器への注入、加速器による加速、および加速器からの抽出のため、適切な可変の周波数および振幅変調信号を生成するという課題に対処しようとするものである。

【0013】

本発明の上記目的、特徴、および利点、ならびに他の目的、特徴、および利点が、添付の図面に示された本発明の好ましい実施形態についての以下のさらに詳しい説明から、明らかになるであろう。添付の図面においては、種々の図面のすべてを通して、同様の参照

50

符号は同じ部分を指し示している。図面は必ずしも比例尺ではなく、本発明の原理を示すことに重点がおかれている。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

本発明は、シンクロサイクロトロン「ディー」すき間を横切って複雑かつ精密に時間合わせされた加速電圧を生成するための装置および方法に関する。本発明は、特定の波形を生成することによって「ディー」すき間を横切る電圧を駆動するための装置および方法を含んでおり、そこでは振幅、周波数、および位相が、個々の加速器の物理的構成、磁界の形状、および先験的に知られていても、先験的に知られていなくてもよい他の変数に鑑みて、最も効果的な粒子の加速を生み出すための要領で制御される。シンクロサイクロトロンは、粒子ビームの合焦を維持するために減少する磁界を必要とし、したがって周波数掃引を所望の形状に変更する必要がある。また、加速される粒子の群が連続的な加速をもたらす電界にさらされるディー上の有効点に、供給される電気信号の予測可能な有限の伝播遅延が存在する。また、ディーすき間を横切って電圧を駆動する高周波(RF)信号を増幅するために使用される増幅器が、周波数とともに変化する位相シフトを有する可能性もある。そのような影響のいくつかは、先験的には知ることができず、シンクロサイクロトロン全体が組み上げられた後でなければ観察できないかも知れない。さらには、ナノ秒の時間単位で粒子の投入および抽出を時間合わせすることで、加速器の抽出効率を高めることができ、動作の加速および抽出段階において失われる粒子に起因する迷放射線を少なくすることができる。

10

20

【0015】

図1Aおよび1Bを参照すると、本発明のシンクロサイクロトロンは、電気コイル2aおよび2bを、離間して配置されて磁界を生成するように構成された2つの金属磁極4aおよび4bの周囲に有する磁界生成器を有している。磁極4aおよび4bは、ヨーク6aおよび6bの対向する2つの部位(断面に示されている)によって定められている。磁極4aおよび4bの間の空間が、真空チャンバ8を形成し、あるいは別個の真空チャンバを磁極4aおよび4bの間に設置することができる。磁界の強度は、おおむね真空チャンバ8の中心からの距離の関数であり、おおまかにはコイル2aおよび2bの幾何形状ならびに磁極4aおよび4bの形状および材料の選択によって決定される。

【0016】

加速電極は、「ディー」10および「ディー」12からなり、両者の間にすき間13を有している。ディー10が、荷電粒子の相対論的質量の増加、ならびにコイル2aおよび2bならびに磁極部分4aおよび4bによって生成され半径方向に減少する磁界(真空チャンバの中心から測定)を補償するため、加速サイクルにおいて高い周波数から低い周波数へと変化する交流電位に接続される。ディー10および12の交流電圧の特徴形状が図2に示されており、以下で詳しく検討される。ディー10は、内側が空洞である半割り円柱の構造である。ディー12は、「ダミー・ディー」とも称されるが、真空チャンバ壁面14において接地されるため、中空円柱構造である必要はない。図1Aおよび1Bに示されているように、ディー12は、例えば銅である金属の帯からなり、実質的に同様であるディー10のスロットに一致するように形作られたスロットを有している。ディー12を、ディー10の表面16の鏡像を形成するように形作ることができる。

30

40

【0017】

イオン源電極20を真空チャンバ8の中心に位置させて備えているイオン源18が、荷電粒子を注入するために設けられている。抽出電極22が、荷電粒子を抽出チャンネル24へと案内して荷電粒子のビーム26を形成すべく設けられている。イオン源を外部に取り付け、加速領域へと実質的に軸方向にイオンを注入してもよい。

【0018】

ディー10および12ならびにサイクロトロンを構成する他のハードウェア部品が、すき間13を横切って振動電界を生成する振動入力電圧のもとで、調節可能な共振回路を定めている。この共振回路を、調節手段を使用することによって、周波数掃引の際にQ係数

50

を高く保つべく調節することができる。

【0019】

本明細書において使用されるとき、Q係数とは、共振周波数付近の周波数に対する応答における共振系の「品質」の指標である。Q係数は、

$$Q = 1 / R \times (L / C)$$

として定められ、ここでRは、共振回路の能動(a c t i v e)抵抗であり、Lはインダクタンスであり、Cはこの回路のキャパシタンスである。

【0020】

調節手段は、可変のインダクタンス・コイルであってよく、あるいは可変のキャパシタンスであってよい。可変キャパシタンス装置は、振動リードまたは回転コンデンサであってよい。図1Aおよび1Bに示した例では、調節手段が回転コンデンサ28である。回転コンデンサ28は、モータ31によって駆動される回転羽根30を有している。モータ31の各4分の1サイクルにおいて、羽根30が羽根32と噛み合うため、「ディー」10および12ならびに回転コンデンサ28を含む共振回路のキャパシタンスが大きくなり、共振周波数が低下する。このプロセスは、羽根が噛み合わせから外れるときは逆になる。このようにして、共振回路のキャパシタンスを変化させることによって、共振周波数を変えることができる。これが、「ディー」へと印加されビームを加速させるために必要である高電圧を生成するために必要とされる電力を、大きな要因として減少させる目的にかなっている。羽根30および32の形状を、共振周波数に必要とされる時間依存性をもたらすように機械加工することができる。

【0021】

羽根の回転を、高周波空洞のQ係数を変化させることによって、サイクロトロンによって定められる共振回路の共振周波数を「ディー」10および12へと加えられる交流電位の周波数の付近に保てる様に、高周波周波数の生成に同期させることができる。

【0022】

羽根の回転を、図3および図4を参照して以下で説明するデジタル波形生成器によって、共振回路の共振周波数をデジタル波形生成器によって生成される電流周波数の付近に維持する要領で、制御することができる。あるいは、デジタル波形生成器を、最適な共振条件を維持するように波形生成器のクロック周波数を制御すべく、回転コンデンサの軸33上の角度位置センサ(図示されていない)によって制御してもよい。この方法は、回転コンデンサにおいて噛み合う羽根の形状が軸の角度位置に正確に関連している場合に、使用可能である。

【0023】

さらに、ピーク共振状態を検出するセンサ(図示されていない)を、共振周波数への最高の一致を維持すべくデジタル波形生成器のクロックにフィードバックをもたらすために、使用することが可能である。共振状態を検出するためのセンサは、共振回路における振動電圧および電流を測定することができる。他の例においては、センサが容量センサであってよい。この方法は、回転コンデンサの噛み合う羽根の形状と軸の角度位置との間の関係の小さな不整に対応することができる。

【0024】

真空ポンプ・システム40が、加速ビームが散乱することがないように、真空チャンバ8をきわめて低い圧力に維持する。

【0025】

シンクロサイクロトロンにおいて均一な加速を達成するため、「ディー」のすき間を横切る電界の周波数および振幅を、相対論的質量増加および半径方向(荷電粒子の螺旋状の軌跡の中心からの距離として測定される)における磁界の変化を補償するとともに、粒子ビームの合焦を維持するために、変化させる必要がある。

【0026】

図2は、シンクロサイクロトロンにおいて荷電粒子を加速させるために必要とされると考えられる波形を、理想化して示している。数サイクル分の波形のみが示されており、必

10

20

30

40

50

ずしも理想的な周波数および振幅の変調の形状を表しているわけではない。図2は、所与のシンクロサイクロトロンにおいて使用される波形について、時間とともに変化する振幅および周波数の特性を示している。粒子の速度が光の速さのかなりの部分へと近付いて、粒子の相対論的質量が増すにつれ、周波数が高い周波数から低い周波数へと変化する。

【0027】

本発明は、ナノ秒の時間単位にて高速メモリから必要とされる信号を生成することができる一式の高速デジタル アナログ変換器(DAC)を使用する。図1Aを参照すると、ディーすき間13を横切る電圧を駆動する高周波(RF)信号、ならびに注入電極20および抽出電極22の電圧を駆動する信号の両者を、DACによってメモリから生成することができる。加速器信号は、可変の周波数および振幅の波形である。注入器および抽出器信号は、少なくとも3つの種類のうちのいずれかであってよい。すなわち、連続的な信号、加速器波形と同期して加速器波形の1つ以上の周期にわたって動作できるパルスなどの不連続な信号、または加速器波形と同期して加速器波形周波数掃引の際に正確に時間合わせされた場面において動作できるパルスなどの不連続な信号、のうちのいずれかであってよい(図8A~Cに関連して後述)。

10

【0028】

図3Aおよび図3Bは、粒子加速器302、波形生成システム319、および増幅システム330を備える本発明のシンクロサイクロトロン300のブロック図を示している。さらに図3Aは、最適化器350を備える適応フィードバック・システムを示している。随意による可変コンデンサ28およびモータ31への駆動サブシステムは、示されていない。

20

【0029】

図3Bを参照すると、粒子加速器302は、図1Aおよび1Bに示した粒子加速器と実質的に同様であり、「ダミー・ディー」(接地されたディー)304、「ディー」306およびヨーク308、イオン源312へと接続された注入電極310、ならびに抽出電極314を備えている。ビーム監視器316が、ビーム318の強度を監視する。

【0030】

シンクロサイクロトロン300は、プログラマブル・デジタル波形生成器319を備えている。デジタル波形生成器319は、メモリ322に保存された波形のデジタル表現(representations)をアナログ信号に変換する1つ以上のデジタル アナログ変換器(DAC)320を有している。コントローラ324が、あらゆる時点において、適切なデータを出力するようメモリ322のアドレス指定を制御するとともに、当該データが適用されるDAC320を制御する。さらにコントローラ324は、メモリ322へとデータを書き込む。インターフェイス326が、外部のコンピュータ(図示されていない)へのデータ・リンクを提供する。インターフェイス326は、光ファイバー・インターフェイスであってよい。

30

【0031】

「アナログ デジタル」変換プロセスのタイミングを制御するクロック信号を、デジタル波形生成器への入力として利用可能にできる。この信号を、生成される周波数を微細に調節するために、回転コンデンサ(図1Aおよび1B)の軸位置エンコーダ(図示されていない)または共振状態検出器と組み合わせて使用することができる。

40

【0032】

図3Aには、3つのDAC320a、320b、および320cが示されている。この例では、DAC320aおよび320bからの信号が、それぞれ増幅器328aおよび328bによって増幅される。DAC320aからの増幅済み信号が、イオン源312および/または注入電極310を駆動する一方で、DAC320bからの増幅済み信号が、抽出電極314を駆動する。

【0033】

DAC320cによって生成された信号は、高周波増幅器制御システム332の制御のもとで動作する増幅システム330へと渡される。増幅システム330において、DAC

50

320cからの信号が、高周波ドライバ334によって高周波スプリッタ336へと加えられ、高周波スプリッタ336が、高周波電力増幅器338によって増幅されるべき高周波信号を送出する。図3Aに示した例では、4つの電力増幅器338a、b、c、およびdが使用されている。所望の増幅の程度に応じて、任意の数の増幅器338を使用することができる。増幅された信号が、高周波合成器340によって合成され、フィルタ342によってフィルタ処理され、高周波が増幅システム330へと反射して戻ることがないようにする方向性結合器344を通過して、増幅システム330を出る。増幅システム330を動作させるための電力は、電源346によって供給される。

【0034】

DAC320cからの信号は、増幅システム330を出た後に、マッチング回路348を介して粒子加速器302に渡される。マッチング回路348は、負荷(粒子加速器302)および供給元(増幅システム330)のインピーダンスを整合させる。マッチング回路328は、一式の可変リアクタンス素子を備えている。

10

【0035】

さらに、シンクロサイクロトロン300は、最適化器350を備えることができる。最適化器350は、ビーム監視器316によるビーム318の強度の測定を使用し、プログラマブル・プロセッサの制御のもとで、DAC320a、b、およびcによって生成される波形およびそれらのタイミングを、シンクロサイクロトロン300の動作を最適化して荷電粒子の最適な加速を達成するために調節できる。

【0036】

デジタル波形生成器319および適応フィードバック・システム350の動作の原理を、以下で図4を参照しつつ説明する。

20

【0037】

波形についての初期条件を、磁界中での荷電粒子の運動を支配する物理的原理、荷電粒子の質量の挙動を説明する相対論的機構、ならびに真空チャンバにおける半径の関数としての磁界の理論的記述から、計算することができる。これらの計算が、ステップ402において実行される。ディーすき間における電圧の理論波形 $RF(\quad, t)$ (ここで、 \quad はディーすき間を横切る電界の周波数であり、 t は時間である)が、サイクロトロンの物理的原理、荷電粒子の運動の相対論的機構、および磁界の理論的な半径依存性にもとづいて計算される。

30

【0038】

シンクロサイクロトロンがこれらの初期条件のもとで動作しているときに、理論からの現実のずれを測定することができ、波形を補正することができる。例えば、図8A~Cに関して後述されるように、加速波形に対するイオン注入器のタイミングを、注入される粒子の被加速粒子群への取り込みを最大にするように、変化させることができる。

【0039】

高周波配線の物理的な配置構成に存在する伝播遅延を補正するため、加速器波形のタイミングを、後述のように、サイクルごとの考え方にもとづいて調節および最適化することができ、ディーの配置または製造における非対称を、ピーク正電圧を次のピーク負電圧に対して時間において近付けて配置(あるいは、その反対)して、実質的に非対称の正弦波を生成することによって、補正することができる。

40

【0040】

一般に、ハードウェアの特性に起因する波形のひずみを、装置に応じて決まる伝達関数 A を使用して、理論波形 $RF(\quad, t)$ をあらかじめひずませることによって補正することができ、陽子が加速サイクルにある加速電極上の特定の点に、所望の波形を出現させることができる。したがって、再び図4を参照すると、ステップ404において、実験的に測定される装置の入力電圧に対する応答にもとづいて、伝達関数 $A(\quad, t)$ が計算される。

【0041】

ステップ405において、式 $RF(\quad, t) / A(\quad, t)$ に相当する波形が計算され

50

、メモリ322に保存される。ステップ406において、デジタル波形生成器319が、メモリからのRF/A波形を生成する。駆動信号RF(, t) / A(, t)が、ステップ408において増幅され、増幅済みの信号が、ステップ410において装置全体300へと伝えられ、ステップ412においてデューキ間を横切って電圧が生成される。代表的な伝達関数A(, t)のさらに詳細な説明は、図6A~Cを参照しつつ後述される。

【0042】

ビームが所望のエネルギーに達した後、加速器からビームを抽出するため、正確に時間合わせされた電圧を、所望のビーム軌跡を生み出すべく抽出電極または装置へと印加することができ、これがステップ414aにおいてビーム監視器によって測定される。RF電圧および周波数が、ステップ414bにおいて電圧センサによって測定される。ビーム強度および高周波の周波数についての情報が、デジタル波形生成器319へと戻され、今やデジタル波形生成器319が、ステップ406において信号RF(, t) / A(, t)の形状を調節することができる。

10

【0043】

プロセスの全体を、ステップ416において最適化器350によって制御することができる。最適化器350は、波形および波形の相対的なタイミングを最適化するように設計された半自動または全自動のアルゴリズムを実行できる。擬似焼きなまし法(simulated annealing)は、使用することができる最適化アルゴリズムの種類の一例である。最適化アルゴリズムのためにフィードバックを提供すべく、オンラインの診断器具によって、加速の種々の段階においてビームを調査することができる。最適条件が見出されたとき、最適化された波形を保持しているメモリを固定し、或る期間にわたっての安定動作の継続のためにバックアップすることができる。個々の加速器の特性に合わせて正確な波形を調節できるというこの能力は、動作におけるユニットごとの変動を少なくし、サイクロトロン製造公差およびサイクロトロンの構築に使用される材料の特性のばらつきを補償できるようにする。

20

【0044】

回転コンデンサ(図1Aおよび1Bに示したコンデンサ28など)の考え方を、共振状態のピークを検出するため、高周波波形の電圧および電流を測定することによって、このデジタル制御の仕組みに統合することができる。共振状態からのずれを、加速サイクルの全体にわたってピーク共振状態を維持すべく保存されている波形の周波数を調節するため、デジタル波形生成器319(図3を参照)へとフィードバックすることができる。この方法を使用しつつ、依然として振幅を正確に制御することができる。

30

【0045】

随意により、回転コンデンサ28(図1Aおよび1Bを参照)の構造を、図1Aおよび1Bに示した真空ポンプ40など、加速器空洞を真空引きするターボ分子真空ポンプと一体化することができる。この一体化は、高度に統合された構造およびコストの削減をもたらすと考えられる。回転羽根30の速度および角度位置について微細な制御をもたらすため、ターボポンプのモータおよび駆動部に、回転エンコーダなどのフィードバック素子を設けることができ、モータ駆動の制御を、加速波形の適切な同期を保証するため、波形生成器319の制御回路と統合することが考えられる。

40

【0046】

上述のように、振動入力電圧の波形のタイミングを、装置において生じる伝播遅延を補正すべく調節することができる。図5Aが、高周波入力点504から加速電極500の加速表面502上の点506および508のそれぞれまでの距離R1およびR2の相違に起因する波の伝播誤差の例を説明している。距離R1およびR2の相違が、信号の伝播遅延を生じさせ、これが点506を中心とする螺旋状の経路(図示されていない)に沿って加速する粒子に悪影響を及ぼす。曲線510によって表されている入力波形が、距離の増加によって引き起こされる余分な伝播遅延を考慮していない場合、粒子が、加速波形との同期から外れる可能性がある。加速電極500上の点504における入力波形510は、粒

50

子が点506の中心から外へと加速されるにつれて変化する遅延に直面する。この遅延が、点506においては波形512を有する入力電圧をもたらすが、点508においては異なる時間の波形514をもたらす。波形514は、波形512に対して位相のずれを呈しており、これが加速のプロセスに悪影響を及ぼしうる。加速用の構造の物理的な大きさ（約0.6メートル）が、加速周波数の波長（約2メートル）に対して有意な割合であるため、加速用の構造の種々の部分の間で、大きな位相のずれに直面することになる。

【0047】

図5Bにおいては、波形516を有する入力電圧が、波形510によって説明した入力電圧と同じ大きさを有するが、時間遅延によって反対の符号を有するように、あらかじめ調節されている。結果として、加速電極500を横切る経路長の相違によって引き起こされる位相の遅延が補正される。結果としての波形518および520が、今や正確に整列しており、粒子の加速プロセスの効率を向上させている。この例は、容易に予測できる1つの幾何形状の影響によって生じる伝播遅延の単純な場合を説明している。ほかにも波形のタイミングへの影響が、実際の加速器において使用されるさらに複雑な幾何形状によって引き起こされる可能性があるが、それらの影響は、予測または測定が可能であるならば、この例において説明した同じ原理を使用することによって補償が可能である。

【0048】

上述のように、デジタル波形生成器が、 $RF(\omega, t) / A(\omega, t)$ の形式の振動入力電圧を生成し、ここで $RF(\omega, t)$ がデューズキ間を横切る所望の電圧であり、 $A(\omega, t)$ が伝達関数である。代表的な装置特有の伝達関数 A が、図6Aにおいて曲線600で示されている。曲線600は、Q係数を周波数の関数として示している。曲線600は、理想的な伝達関数からの2つの望ましくないずれ、すなわちトラフ602および604を有している。これらのずれは、共振回路の構成要素の物理的な長さまたはそれら構成要素の望ましくない自己共振特性に起因する影響、あるいはその他の影響によって引き起こされる可能性がある。この伝達関数を測定することができ、入力電圧の補償を計算して、波形生成器のメモリに保存することができる。この補償関数610の説明が、図6Bに示されている。補償済みの入力電圧610が装置300へと加えられるとき、結果としての電圧620は、効率的な加速を与えるように計算された所望の電圧形状に関して一様である。

【0049】

プログラマブル・波形生成器によって制御できる影響の種類他の例が、図7に示されている。いくつかのシンクロサイクロトロンにおいては、加速に使用される電界強度を、粒子が螺旋状の経路705に沿って外へと加速されるにつれて、いくらか小さくなるように選択することができる。この電界強度の減少は、図7Aに示されるような比較的一定に保たれる加速電圧700を加速電極702へと加えることによって達成される。電極704は、通常は接地電位にある。すき間における電界強度は、印加電圧をすき間の長さで割ったものである。図7Bに示すように、加速電極702および704の間の距離は、半径 R とともに増加している。結果として、半径 R の関数としての電界強度は、図7Cに曲線706として示される。

【0050】

プログラマブル・波形生成器を使用することによって、加速電圧708の振幅を、図7Dに示すように所望の型で様相することができる。この変調によって、加速電極710および712の間の距離を、図7Eに示すように一定のままに保つことができる。結果として、図7Fに示されているが、半径の関数として得られる同じ電界強度714が、図7Cに示したように生成される。これは、シンクロサイクロトロン・システムの影響についての他の種類の制御の単純な例であり、電極の実際の形状および半径に対する加速電圧の形状は、必ずしもこの単純な例に従わなくてもよい。

【0051】

上述のように、プログラマブル・波形生成器を、粒子の注入を精密に時間合わせすることによって荷電粒子の最適な加速を達成すべく、イオン注入器（イオン源）を制御するた

10

20

30

40

50

めに使用することができる。図 8 A が、プログラマブル・波形生成器によって生成される高周波加速波形を示している。図 8 B は、精密に時間合わせされたサイクルごとの注入器信号を示しており、この信号によってイオン源を、イオンの小さな群を加速プロセスの受け入れ位相角 (a c c e p t a n c e p h a s e a n g l e) に同期すべく精密に制御された間隔で加速器空洞へと注入するため、精密な様相で駆動することができる。粒子の群は、通常はビームの安定のため高周波電界波形に比べて約 30 度の遅延角度で加速器を通過して移動するため、信号がほぼ正確な整列にて示されている。デジタル アナログ変換器の出力など、或る外部の点での信号の実際のタイミングは、2つの信号の伝播遅延が相違する可能性があるため、この正確な関係を有さないかもしれない。プログラマブル・波形生成器においては、注入されるパルスの加速プロセスへの結合を最適化するために、注入パルスのタイミングを高周波波形に対して連続的に変化させることができる。この信号を、ビームをオン/オフするために有効化または無効化することができる。また、必要とされる平均ビーム電流を維持するため、信号をパルス間引き技法 (p u l s e d r o p p i n g t e c h n i q u e s) によって変調することができる。このビーム電流の調節は、1000個程度の或る比較的多数のパルスを含んでいる巨視的期間を選択し、この期間において有効化されるパルスの割合を変化させることによって達成される。

10

【 0 0 5 2 】

図 8 C は、複数回の高周波サイクルに対応するより長い注入制御パルスを示している。このパルスは、陽子の群を加速すべきである場合に生成される。周期的な加速プロセスでは、捕捉され、最終的なエネルギーに達して抽出される粒子は、限られた数でしかない。イオン注入のタイミングを制御することで、ガスの負荷をより少なくし、結果としてより良好な真空状態をもたらすことができ、これは真空ポンプの要件を軽減し、加速サイクルの際の高電圧およびビーム損失特性を改善する。これは、図 8 B に示した精密な注入タイミングを必要としなくても高周波波形位相角に対するイオン源の受け入れ可能な結合が可能である場合に、使用可能である。この手法は、シンクロサイクロトロンにおける加速プロセスによって受け入れられる「回転」の数にほぼ相当するいくつかの高周波サイクルにおいてイオンを注入する。この信号も、ビームのオン/オフまたは平均ビーム電流の変調のために、有効化または無効化することができる。

20

【 0 0 5 3 】

本発明を、本発明の好ましい実施形態を参照して詳しく示して説明したが、添付の特許請求の範囲によって包含される本発明の技術的範囲から離れることなく、形態および詳細についてさまざまな変更が可能であることを、当業者であれば理解できるであろう。

30

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 4 】

【 図 1 A 】 本発明のシンクロサイクロトロンの平面断面図である。

【 図 1 B 】 図 1 A に示したシンクロサイクロトロンの側面断面図である。

【 図 2 】 図 1 A および 1 B に示したシンクロサイクロトロンにおいて荷電粒子を加速するために使用できる理想的な波形を示している。

【 図 3 A 】 波形生成器システムを備える本発明のシンクロサイクロトロンのブロック図を示している。

40

【 図 3 B 】 波形生成器システムを備える本発明のシンクロサイクロトロンのブロック図を示している。

【 図 4 】 本発明のデジタル波形生成器および適応フィードバック・システム (最適化器) の動作の原理を説明するフロー図である。

【 図 5 A 】 加速電極 (「ディー」) 構造内の異なる経路を通過する信号の有限の伝播遅延の影響を示す図である。

【 図 5 B 】 「ディー」構造にわたる伝播遅延のばらつきを補正すべくタイミングが調節された入力波形を示す図である。

【 図 6 A 】 寄生回路作用に起因する変化を有する共振系の周波数応答例を示す特性図である。

50

【図 6 B】寄生回路作用に起因する周波数応答の変化を補正するように計算された波形図を示している。

【図 6 C】図 6 B に示した波形が入力電圧として使用された場合に得られる系の「平坦」な周波数応答を示す特性図である。

【図 7 A】図 7 B に示した加速電極に加えらる一定振幅の入力電圧を示す特性図である。

【図 7 B】電極間の距離が中心に向かって減じられている加速電極形状の例を示す図である。

【図 7 C】電極すき間における半径の関数としての電界強度を示す特性図であって、図 7 A に示した入力電圧を図 7 B に示した電極形状へと加えることによって得られる安定かつ効率的な荷電粒子の加速を達成する望ましい電界強度の図を示している。

10

【図 7 D】所望される電界強度に直接相当しており、デジタル波形生成器を使用して生成することができる半径の関数としての入力電圧を示す特性図である。

【図 7 E】印加電圧と電界強度との間に直接の比例をもたらす加速電極の平行配置図を示している。

【図 7 F】電極すき間における半径の関数としての電界強度を示す特性図であって、図 7 D に示した入力電圧を図 7 E に示した電極形状へと加えることによって得られる安定かつ効率的な荷電粒子の加速を達成する望ましい電界強度の図を示している。

【図 8 A】プログラマブル・波形生成器によって生成される加速電圧の波形例を示す信号波形図である。

20

【図 8 B】時間合わせされたイオン注入器信号の例を示す信号波形図である。

【図 8 C】時間合わせされたイオン注入器信号の他の例を示す信号波形図である。

【符号の説明】

【 0 0 5 5 】

2 a コイル

2 b コイル

4 a 金属磁極

4 b 金属磁極

6 a ヨーク

6 b ヨーク

30

1 0 ディー

1 2 ディー ダミー・ディー

1 3 すき間

1 8 イオン源

2 2 抽出電極

2 8 回転コンデンサ 可変コンデンサ

3 0 0 シンクロサイクロトロン

3 0 4 ディー ダミー・ディー

3 0 6 ディー

3 1 0 注入電極

40

3 1 2 イオン源

3 1 4 抽出電極

3 1 6 ビーム監視器

3 1 9 デジタル波形生成器

【図1A】

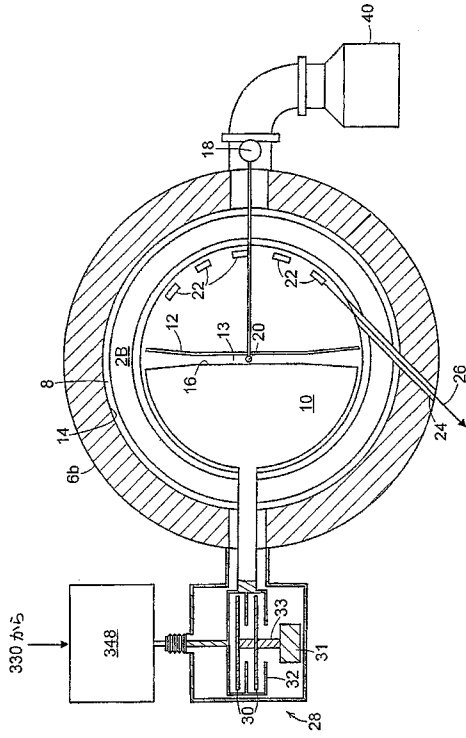


FIG. 1A

【図1B】

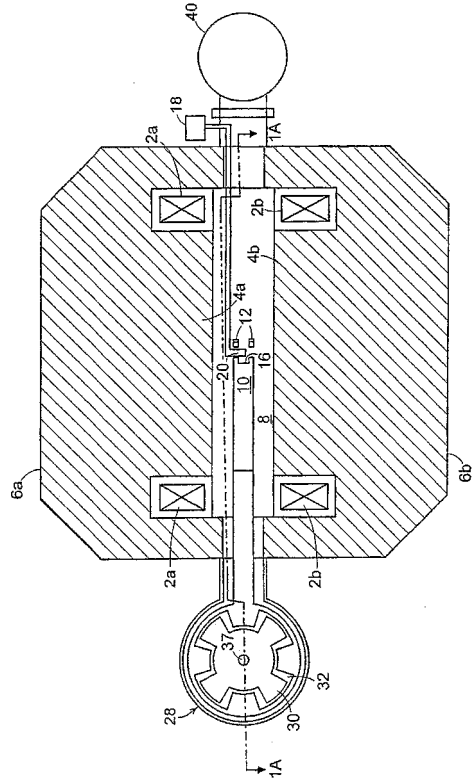


FIG. 1B

【図2】

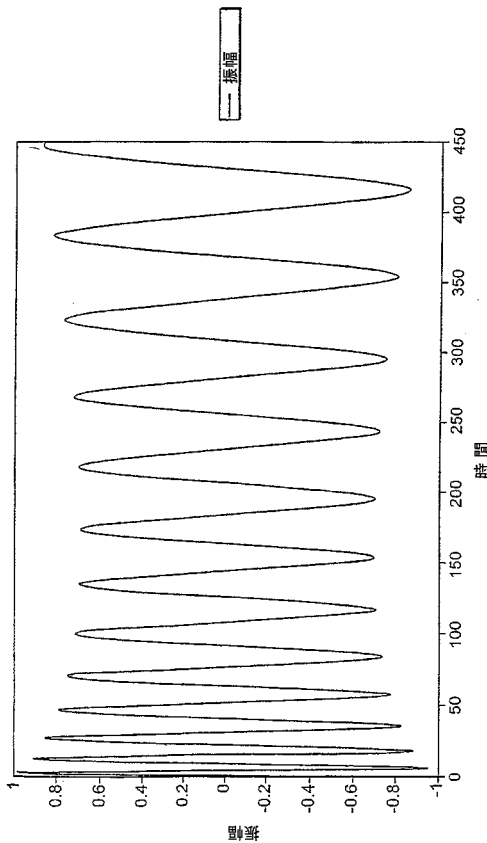


FIG. 2

【図3A】

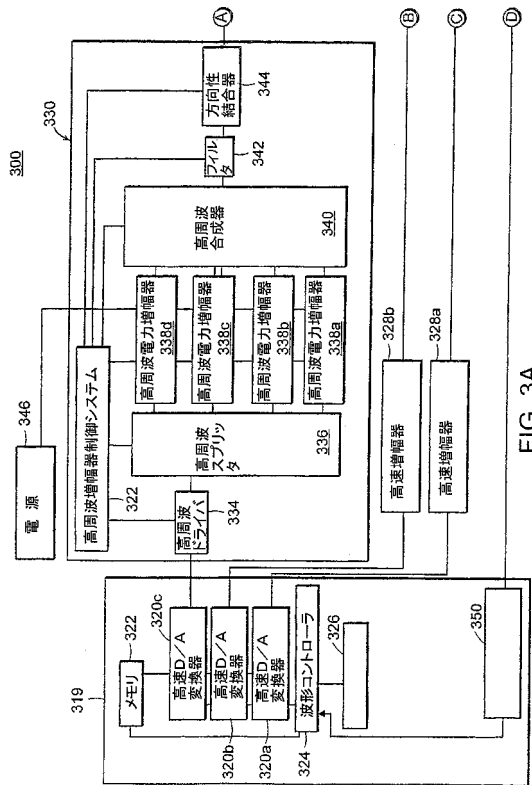


FIG. 3A

【図3B】

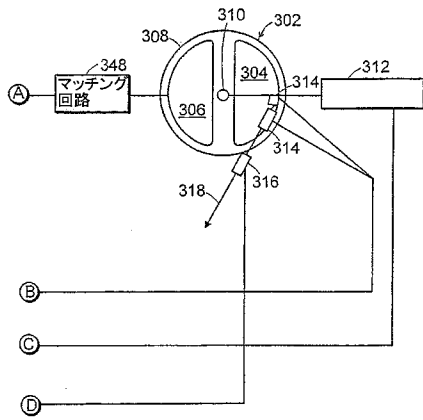


FIG. 3B

【図4】

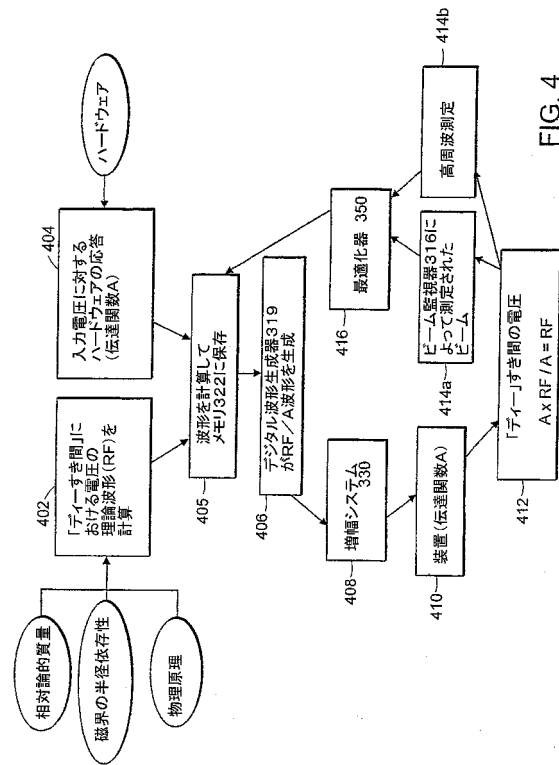


FIG. 4

【図5A】

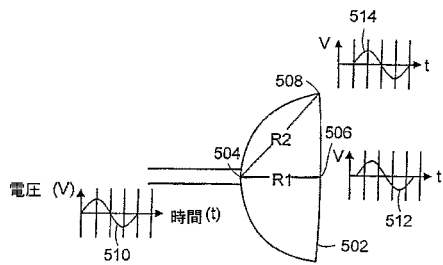


FIG. 5A

【図6A】

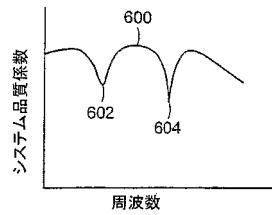


FIG. 6A

【図5B】

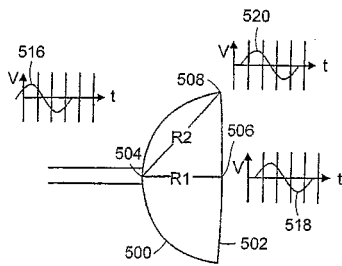


FIG. 5B

【図6B】

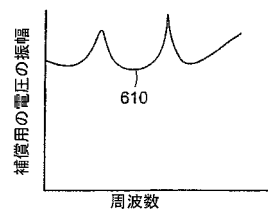


FIG. 6B

【図6C】

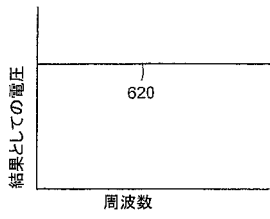


FIG. 6C

【図7C】

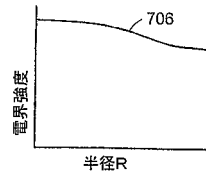


FIG. 7C

【図7A】

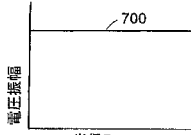


FIG. 7A

【図7D】

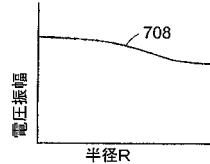


FIG. 7D

【図7B】

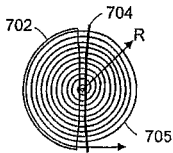


FIG. 7B

【図7E】

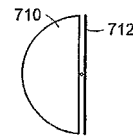


FIG. 7E

【図7F】

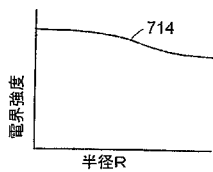


FIG. 7F

【図8A】

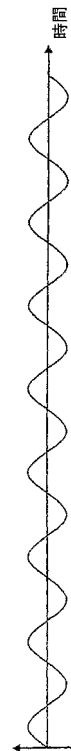


FIG. 8A

【 図 8 B 】



FIG. 8B

【 図 8 C 】



FIG. 8C

フロントページの続き

(72)発明者 スリスキー・アラン

アメリカ合衆国, マサチューセッツ州 01772, リンカーン, コンコード ロード 273

(72)発明者 ガル・ケネス

アメリカ合衆国, マサチューセッツ州 01451, ハーバード, マサチューセッツ アベニュー
234

審査官 木下 忠

(56)参考文献 米国特許第06441569 (US, B1)

米国特許第04345210 (US, A)

特開2002-270400 (JP, A)

特表2003-504628 (JP, A)

R. Schneider, J. Rainwater, Nevis Synchrocyclotron Conversion Program - RF System, IE
EE Transactions on Nuclear Science, 1969年, Vol. 16, pp. 430-433

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H05H3/00-15/00