

(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2007-73391

(P2007-73391A)

(43) 公開日 平成19年3月22日(2007.3.22)

(51) Int. Cl. F I テーマコード(参考)
 H05H 13/04 (2006.01) H05H 13/04 D 2G085
 H05H 7/18 (2006.01) H05H 7/18

審査請求有 請求項の数 15 O L (全 35 頁)

(21) 出願番号 特願2005-260112 (P2005-260112)
 (22) 出願日 平成17年9月8日(2005.9.8)

(71) 出願人 000006013
 三菱電機株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
 (74) 代理人 100094916
 弁理士 村上 啓吾
 (74) 代理人 100073759
 弁理士 大岩 増雄
 (74) 代理人 100093562
 弁理士 児玉 俊英
 (74) 代理人 100088199
 弁理士 竹中 岑生
 (72) 発明者 永山 貴久
 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三
 菱電機株式会社内

最終頁に続く

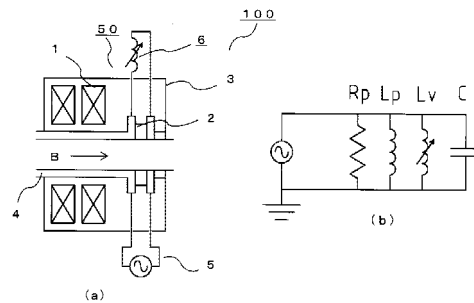
(54) 【発明の名称】 高周波加速空洞および円形加速器

(57) 【要約】

【課題】 荷電粒子ビームを加速する円形加速器に用いられる高周波加速空洞において、従来技術では共振点を加速周波数帯域に設定するための加速コアのインピーダンスを自由に選ぶことができず、高周波加速空洞のインピーダンスを十分に大きく出来ないという課題を解決し、加速コア材への要求条件を緩和し、高いインピーダンスの高周波加速空洞を提供する。

【解決手段】 加速空洞本体の加速電極ギャップに並列接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段を備え、荷電粒子を加速するための加速周波数の変化パターンに合わせてインダクタンス可変手段のインダクタンスを変化させることにより加速周波数と高周波加速空洞の共振周波数とを同調させる。また、空洞の加速周波数帯域が狭い場合は、加速電極ギャップに並列に固定インダクタンスを設けることでも、空洞のインピーダンスを大きくできる。

【選択図】 図1



- 1: 加速コア
- 2: 加速電極ギャップ
- 3: 空洞外壁
- 4: 真空ダクト
- 5: 高周波電源
- 6: インダクタンス可変手段
- 50: 加速空洞本体
- 100: RF加速空洞

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積する円形加速器に用いられる高周波加速空洞であって、前記高周波加速空洞は、前記荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップおよび前記荷電粒子ビームの軌道を取りまく磁路を形成する加速コアとが設けられた加速空洞本体と、前記加速電極ギャップに並列に接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段とを備えており、前記荷電粒子を加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする高周波加速空洞。

10

【請求項 2】

前記インダクタンス可変手段は、周方向にギャップが設けられたトロイダルコアと、該トロイダルコアと直交し、回転中心が前記トロイダルコア外周より離れた個所に配置された平板状トロイダル磁性体と、該平板状トロイダル磁性体の回転駆動機構とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて、前記平板状トロイダル磁性体が前記回転駆動機構によって回転駆動され、前記トロイダルコアのギャップ内を回転通過して前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

20

【請求項 3】

前記平板状トロイダル磁性体は、トロイダル磁性材とトロイダル非磁性材とで構成されており、前記トロイダル磁性材およびトロイダル非磁性材はともに、板厚方向において所定の角度傾斜したテーパ面が形成されているとともに、該テーパ面を互いに接するよう組み合わせ合わせて一体化し、平板状トロイダル磁性体が形成されていることを特徴とする請求項 2 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 4】

前記平板状トロイダル磁性体は、トロイダル磁性材とトロイダル非磁性材とで構成されており、前記トロイダル磁性材およびトロイダル非磁性材はともに、トロイダル周方向に複数個分割されているとともに、板厚方向の断面形状が鋸歯状をなし、前記トロイダル磁性材の鋸歯状の山と谷が、前記トロイダル非磁性材の谷と山とに周方向に順次周期的に互いに組み合わせられて一体化し、平板状トロイダル磁性体が形成されていることを特徴とする請求項 2 に記載の高周波加速空洞。

30

【請求項 5】

前記インダクタンス可変手段は、半円状トロイダル固定コアと、該半円状トロイダル固定コアと所定のギャップ長を介するとともに、同軸上で回転可能に配置された半円状トロイダル回転コアと、該半円状トロイダル回転コアの回転駆動機構とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記回転駆動機構によって前記半円状トロイダル回転コアが回転駆動され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

40

【請求項 6】

前記半円状トロイダル回転コアには、該半円状トロイダル回転コア全体を覆う非磁性材の半球状回転バランスが設けられていることを特徴とする請求項 5 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 7】

前記インダクタンス可変手段は、半円状トロイダル固定コアと、該半円状トロイダル固定コアに所定のギャップ長を介するとともに同軸上に回転可能に配置され、2 個の半円状トロイダル回転コアが互いに 90° 直交して形成された多極トロイダル回転コアと、該多極トロイダル回転コアの回転駆動機構とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速する

50

ための加速周波数の変化パターンに合わせて前記回転駆動機構によって前記多極トロイダル回転コアが回転駆動され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 8】

荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積する円形加速器に用いられる高周波加速空洞であって、前記高周波加速空洞は前記荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップと、前記荷電粒子ビーム軌道を取りまく磁路を形成する加速コアとが設けられた加速空洞本体と、前記加速電極ギャップに並列に接続された固定インダクタンスとを備えており、前記固定インダクタンスの寸法を選定することにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする高周波加速空洞。

10

【請求項 9】

前記インダクタンス可変手段は、空洞コアと可変定電流電源とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記可変定電流電源によって前記空洞コアにバイアス磁界が印加され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 10】

前記インダクタンス可変手段は、複数の空洞コアが直列に設けられ、該空洞コアにそれぞれ設けられた可変定電流電源およびスイッチとで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記各スイッチが ON されることにより、前記空洞コアにバイアス磁界が印加され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

20

【請求項 11】

前記インダクタンス可変手段は、複数の空洞コアが直列に設けられ、前記複数の空洞コアの隣り合う空洞コア間の回路上にはスイッチが設けられており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記スイッチが ON され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞との共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

30

【請求項 12】

前記加速コア材の μ_p 、 Q 、 f 値と、前記インダクタンス可変手段の磁性材の μ_p 、 Q 、 f 値が異なる材質であり、かつ、前記加速コア材の μ_p 、 Q 、 f 値が前記インダクタンス可変手段の磁性体の μ_p 、 Q 、 f 値より小さいことを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 13】

前記加速コア材の μ_p 、 Q 、 f 値と、前記固定インダクタンスの磁性材の μ_p 、 Q 、 f 値が異なる材質であり、かつ、前記加速コア材の μ_p 、 Q 、 f 値が前記固定インダクタンスの磁性体の μ_p 、 Q 、 f 値より小さいことを特徴とする請求項 8 に記載の高周波加速空洞。

40

【請求項 14】

荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積する円形加速器に用いられる高周波加速空洞であって、前記高周波加速空洞は、前記荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップおよび前記荷電粒子ビームの軌道を取りまく磁路を形成する加速コアとが設けられた加速空洞本体と、前記加速電極ギャップに並列に接続されたインダクタンスを備えることを特徴とする高周波加速空洞。

【請求項 15】

請求項 1 ~ 請求項 14 のいずれか 1 項に記載の前記高周波加速空洞を備え、荷電粒子ビーム

50

ムを加速あるいは蓄積することを特徴とする円形加速器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は円形荷電粒子加速器に用いられる高周波加速空洞およびこの高周波加速空洞を用いた円形加速器に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来より荷電粒子を加速する円形加速器に用いられている高周波加速空洞にはよく知られているように同調型高周波加速空洞（以下、同調型RF加速空洞と称す）と、非同調型高周波加速空洞（以下、非同調型RF加速空洞と称す）とがある。これらの高周波加速空洞（以下、RF加速空洞と称す）を用いた、例えばイオンシンクロトロンにおいて、イオンを加速しようとするときイオンがシンクロトロン内を周回する際の周回周波数と等しい高周波を高周波電源からRF加速空洞に印加しなければならない。

10

前記同調型RF加速空洞は、空洞の共振周波数を高周波電源の印加周波数に同調させて、必要な加速電圧を発生させる。一方、非同調型RF加速空洞は、予め加速周波数の全範囲で空洞のインピーダンスを必要な値まで上げておく。

【0003】

前記同調型RF加速空洞において、印加周波数とRF加速空洞の共振周波数との共振周波数制御をシーケンス制御で行うために、RF加速空洞内に透磁率の虚数部の大きいフェライトを装荷し、RF加速空洞のQ値（共振周波数に対する共振幅の比）を低下させ、前記フェライトの透磁率を調節するための磁場を発生させるバイアスコイルを装荷し、バイアスコイルの作る磁場の強さによって、フェライトの透磁率の実数部分を変化させ、RF加速空洞内に励起される電磁場の共振周波数を制御することが示されている（例えば、特許文献1）。

20

【0004】

一方、前記非同調型RF加速空洞において、加速周波数範囲で一定のインピーダンスをもつことを実現するために、ジュール損の大きいフェライトをRF加速空洞内に装荷し、フェライトによるインピーダンスを大きくし、シャント抵抗をフェライトに並列接続した構成で、フェライトによる抵抗値 Z_{fer} が低い周波数領域では抵抗値の大きなシャント抵抗を接続し、抵抗値 Z_{fer} が大きい周波数領域では抵抗値の小さなシャント抵抗に接続を切り替えることが示されている（例えば、特許文献2）。

30

【0005】

またさらに非同調型RF加速空洞において、RF加速空洞のQ値を任意に調整することでビームローディング（イオンビームがRF加速空洞に及ぼす影響）を低減させ、均一にビームを加速することを目的として、フェライトを用いた加速コアを中心軸を含む平面によって複数に分割することが示されている（例えば、特許文献3）。

【0006】

【特許文献1】特開平07-006900号公報

【特許文献2】特開平07-161500号公報

40

【特許文献3】特開2001-126900号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら前記特許文献1のRF加速空洞では、フェライトに直流バイアスをかけフェライトコアの飽和磁界の近傍で使用するため、RF加速空洞に大きな高周波磁界を印加できないという問題点や、またフェライトの冷却構造がなされなくフェライトのインダクタンスが温度上昇による影響を受けやすく、安定した制御が得にくいという問題点を有している。

また、前記特許文献2のRF加速空洞では、共振点を加速周波数帯域に設定する必要が

50

あるために、加速コアのインピーダンスを自由に選ぶことができず、RF加速空洞のインピーダンスを十分に大きくできないという問題点を有している。さらに前記特許文献3の高周波加速空洞では、大型コアの場合、コア切断コストが上昇し、また切断面端部の磁界集中による発熱などの問題点を有している。

【0008】

この発明は前記のような課題を解決するために為されたものであって、空洞本体の加速電極ギャップに並列にインダクタンス、もしくはインダクタンス可変手段を設け、加速コアとインダクタンス可変手段の磁性材とで合成されるインダクタンスと、加速電極ギャップのキャパシタンスとを共振させ、高いインピーダンスの高周波加速空洞およびこの高周波加速空洞を用いた円形加速器を得るものである。

10

【課題を解決するための手段】

【0009】

この発明に係る高周波加速空洞は、荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップと、荷電粒子ビーム軌道を取りまく磁路を形成する加速コアとが設けられた加速空洞本体と、加速電極ギャップに並列に接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段とを備えており、荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせてインダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、荷電粒子ビームの加速周波数と高周波加速空洞との共振周波数とを同調させるものである。

【発明の効果】

20

【0010】

この発明の高周波加速空洞は、加速電極ギャップに並列に接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを、荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて変化させることにより、荷電粒子ビームの加速周波数と高周波加速空洞との共振周波数とを同調させるので、加速空洞のインピーダンスを高くでき、加速コアに必要な条件が緩和され、かつ簡単な構成で同調がとれるという効果がある。

【発明を実施するための最良の形態】

【0011】

本発明の各実施の形態の説明に入る前に、本発明の構成および動作をより理解しやすくするために、まず加速コアと加速電極ギャップで構成される従来型のRF加速空洞の動作を図12に基づいて説明する。

30

図12(a)に示すRF加速空洞100は、加速コア1と加速電極ギャップ2、空洞外壁3、真空ダクト4と、高周波電源5とで構成されている。このような構成であって、数MHz程度の周波数帯域で駆動されるRF加速空洞100は、サイズに比較して高周波数の波長が長いため、その動作はほぼ電気回路モデルで解析することができる。図12(b)はRF加速空洞100を電気回路でモデル化したものを示す。図2(b)のインダクタンス X_s と抵抗 R_s の直列接続がRF加速空洞100に設けられた加速コア1を、キャパシタンス C が加速電極ギャップ2を表している。加速コア1が抵抗成分 R_s を有しているのは、加速コア1の励磁に伴う発熱(コアロス)が、回路で表現すると抵抗に相当するからである。コアロスを含めた加速コア1のインピーダンス Z は、複素透磁率 $\mu (= \mu' - j\mu'')$ を用いて(μ' は透磁率の実数部、 μ'' は透磁率の虚数部)次の数式1によって示される。

40

【0012】

【数 1】

$$\begin{aligned}
 Z &= i \omega \mu L_0 \\
 &= i \omega \mu' L_0 + \omega \mu'' L_0 \\
 &= i \omega L_s + R_s \\
 &= i X_s + R_s
 \end{aligned}$$

【0013】

となる。ここで ω は角周波数（加速周波数を f とすると、 $\omega = 2\pi f$ ）、 L_0 は加速コア 1 のインダクタンス成分、 R_s は加速コア 1 の抵抗成分、 $i X_s$ はインピーダンスの虚数部である。図 12 (b) に示したこのモデルは、加速コア 1 のインダクタンス X_s と抵抗 R_s の直列接続で表現したが、図 12 (c) に示すように並列接続で表現することもできる。並列接続で表現したインダクタンス成分 X_p ($= L_p$) と、抵抗成分 R_p を X_s 、 R_s を用いて表すと次の数式となる。この数式 2 は直列接続と並列接続のインピーダンスが等しいとおくことで求められる。

【0014】

【数 2】

$$\omega L_p = X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = 2\pi \cdot \mu_p Q f \cdot L_0 \quad \left[\mu_p = \frac{\mu'^2 + \mu''^2}{\mu'} \right] \quad 20$$

【0015】

ここで、 R_p はシャントインピーダンスと呼ばれる量であり、後述する数式 3 でも明らかのように、RF 加速空洞 100 のインダクタンス Z_c と加速電極ギャップ 2 のキャパシタンス C が並列共振し、インピーダンスが無限大になった時に得られるインピーダンスである。また通常一般に表現されている $\mu_p Q f$ は加速コア材特有の量（シャント抵抗値、 Q 値）であり、これが大きいほど大きなインピーダンスが得られる。加速電極ギャップ 2 のキャパシタンスも含めた RF 加速空洞のインピーダンス Z_c は、 L_p と R_p を用いて以下となる。

【0016】

【数 3】

$$|Z_c| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \left(\frac{1}{\omega L_p} - \omega C\right)^2}}$$

【0017】

ここで、 $|Z_c|$ はインピーダンスの絶対値である。所定の加速電圧 V （ピーク値）を得るために必要な電力 P は、以下で求められる。

【0018】

【数 4】

$$P = \frac{V^2}{2|Z_c|}$$

【0019】

消費電力を下げるためには、RF 加速空洞 100 のインピーダンス $|Z_c|$ を大きくす 50

ればよい。|Zc|を大きくする一つの方法は、加速周波数範囲において、共振条件(1/Lp=C)を満たすようにインダクタンスを変化させることである(前述の同調型RF加速空洞、特許文献1)。

一方、数式3において、分母の第1項が第2項より十分大きければ、少々共振条件からずれても、|Zc|は低下しない。すなわち、RpをXp(=Lp)と比較して小さくすれば、特に共振を取らなくても実用上は問題がない(非同調型RF加速空洞、特許文献2、3)。この関係を加速コア1のQ値を用いて表現すると、次の5式となる。

【0020】

【数5】

$$Q = \frac{\mu'}{\mu''} = \frac{Xs}{Rs} = \frac{Rp}{Xp} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

10

【0021】

ここで、f0は共振周波数、fは半値幅(|Zc|^2がピークの半分以上を保つ周波数帯域)である。Q値の小さい材質を用いれば、非同調型RF加速空洞を実現することが判る。

【0022】

以上の議論をベースに、従来のRF加速空洞の課題に関し以下説明をする。

加速コア1の磁性体材としてMAコア(Magnetic Alloyコア)、例えば、アモルファス系の積層合金薄膜を用いている非同調型RF加速空洞は、1000Gsを越える磁束密度においてもシャントインピーダンス(損失抵抗)が劣化しない特徴があるが、シャントインピーダンスを数百以上にすることが難しい。

20

一方、フェライトを用いた同調型RF加速空洞は、後述するように非同調型RF加速空洞と比較して、シャントインピーダンスの向上が少ない上に、RF加速空洞に印加可能な加速電圧の最大値が小さいという課題がある。

この2つの課題について、同調型RF加速空洞(フェライトコア材、Q=20)と、非同調型RF加速空洞(MAコア材、Q=0.5)について具体例を挙げて説明する。

【0023】

共振周波数を3MHzとし、図12に示すRF加速空洞100の加速電極ギャップ2キャパシタンスは、50、100、200pFとする。この場合のMAコアとフェライトコアの空洞特性の概算結果を表1に示す。

30

【0024】

【表1】

表1. コア材による空洞特性

積層合金薄膜(MA)			フェライト				
Q		0.5	Q		20		
Δf		6	Δf		0.15		
C(pF)	50	100	200	C(pF)	50	100	200
Xp(Ω)	1061	531	265	Xp(Ω)	1061	531	265
Rp(Ω)	531	265	133	Rp(Ω)	21220	10620	5300

40

【0025】

まず、MAコア材を用いた非同調型RF加速空洞の特性を説明する。

MAコアはQ値が小さいため半値幅が大きい(数式5よりf=6MHz)。この例では、加速周波数帯域(2~4MHzを想定する)が半値幅に含まれるため、計算例では加速の全周波数帯域にわたり、ピーク値の80%程度のインピーダンスを伴っている。一方、共振周波数と加速電極ギャップ2のキャパシタンスが決まれば、Xp、Rp(=Q・Xp)は一意に決まる。加速電極ギャップ2のキャパシタンスを50pF以下に抑制するのは困難なため、MAコア材を用いたRF加速空洞100のインピーダンスを数百以上に

50

するのは難しいことがわかる。

【0026】

次にフェライトコア材を用いた同調型RF加速空洞特性を述べる。フェライト材のQ値にはかなり幅があるが、ここでは仮に、 $Q = 20$ の加速コア1を用いることを想定する。Q値が大きいため半値幅は $1/40$ (0.15MHz)しかないが、RF加速空洞100のインピーダンスについては、MAコア材を用いたRF加速空洞100に比較して40倍まで引き上げることが可能であり、大幅な電力削減を期待できる。

しかしながら、現実のフェライト材を用いたRF加速空洞100では、Q値を1程度のフェライトコア材を用いることが多く、RF加速空洞100のインピーダンスもそれほど上げることが出来ない。その理由はフェライト材のインダクタンス制御が難しく、高Q値のコア(共振周波数以外ではほとんど機能しないコア)を使うと、安定した制御が出来なくなるためである。

10

【0027】

以下、その事情を詳細に説明する。

従来と同調型RF加速空洞100では、加速コア1のインダクタンスを変化させるため、直流磁界を重畳してフェライトコアの透磁率を変化させる方式を採用していた。この方式を図13について説明する。

図13は、フェライトのB-H曲線を示す(簡単のため、ヒステリシスは考慮していない)。透磁率 μ は、 $B = \mu H$ より求められる。Bはコア中の磁束密度、Hは起磁力であり、コアを鎖交する電流に比例する。これより、図13における初透磁率(原点周辺の透磁率)は、 $\mu_1 = \tan(\theta_1)$ ということになる。Hの大きいところではコアが飽和してくるため、B-H曲線の傾きが小さくなる。この性質を用いれば、例えば動作点qにおける透磁率 μ_q は、 $\mu_q = \tan(\theta_q)$ となり、透磁率を変化させることができる。この方式のRF加速空洞100は前述したように、動作の不安定性と、印加可能な加速電圧が小さいことが課題であった。

20

【0028】

まず、動作の不安定性について説明する。

フェライトは一般にキュリー温度が低く、温度によってB-H特性が変化しやすい。特にこの方式は、B-H特性の微分値(透磁率)を制御することで共振させているため、不安定性が拡大されてしまう。さらに、RF加速空洞100を駆動することにより加速コア1自体が発熱し、温度平衡に達するまで加速コア1の温度が変化していくという問題もあり、RF加速空洞100の制御を難しくしている。

30

従来と同調型RF加速空洞100では、制御の難しさ故、加速周波数とRF加速空洞100の共振周波数のマッチング誤差を大きくみる必要があった。これは、マッチングがずれてもインピーダンスが変化しにくいコア、すなわちQ値の低い加速コア1を指向することを意味しており、従来と同調型RF加速空洞では、Q値が~1程度のフェライトコア材を用いることが多かった。

この程度のQ値では、表1に示された高インピーダンスRF加速空洞は実現できず、現在では、熱的安定性、動作領域に優れたMAコア材を用いた非同調型のRF加速空洞100が主流になりつつある。

40

【0029】

次に、印加可能加速電圧が小さい理由について説明する。加速電極ギャップ2に発生する加速電圧Vは、加速コア1内の高周波電流による磁束密度の変化 dB/dt と、加速コア1の断面積Sとの積になる。すなわち、高周波電流による加速コア1中の磁束密度の変化が大きいほど、大きい加速電圧を得ることができる。

加速コア1の動作領域は、通常、加速コア1の飽和磁束密度 B_s の70~90%程度であるから、大きい加速電圧を得るためには、加速コア1を図13の原点両振り動作させるのが望ましい。

しかしこの方式では、直流磁界を重畳して透磁率を変化させているため、加速コア1の動作領域は $B_s - B_q$ の範囲となり大幅に狭くなってしまう。

50

それにも関わらず、一定の加速電圧を得ようとするため、加速コア 1 の断面積を増やす必要があり、結果として同調型 R F 加速空洞 1 0 0 は大型化している。

以上の説明で明らかになったように、従来の同調型 R F 加速空洞 1 0 0 は加速コア 1 に直流磁界を重畳してインダクタンスを変化させたため、種々の不都合を生じていた。

【 0 0 3 0 】

上記のような課題を解決するために本発明が為されたものであり、同調型 R F 加速空洞に係る各構成、動作を各実施の形態について説明する。

【 0 0 3 1 】

実施の形態 1 .

この発明の実施の形態 1 を図に基づいて説明する。図 1 (a) において、R F 加速空洞 1 0 0 は加速コア 1 と加速電極ギャップ 2 と空洞外壁 3 と真空ダクト 4 とで構成される加速空洞本体 5 0 と、高周波電源 5 と前記加速空洞本体 5 0 の外部にあって、前記加速電極ギャップ 2 に並列に設けられたコア材を有するインダクタンス可変手段 6 によって構成されている。なお、荷電粒子ビーム B は図 1 の左側より右側に進むものとする。

10

図 1 (b) は、R F 加速空洞 1 0 0 を並列電気回路でモデル化したものを示す。R p は加速コア 1 の抵抗成分でシャントインピーダンスを示し、L p はインダクタンス成分を示す。L v はインダクタンス可変手段 6 のインダクタンスを示し、C は加速電極ギャップ 2 のキャパシタンスを示す。

この実施の形態 1 における R F 加速空洞 1 0 0 は、加速コア 1 とは別個に同調用のインダクタンスをインダクタンス可変手段 6 として加速電極ギャップ 2 に並列に設け、前記インダクタンス可変手段 6 のインダクタンス量を変化させることで同調運転を可能とするものである。

20

【 0 0 3 2 】

次にインダクタンス可変手段 6 の動作を説明する。最初に前記加速コア 1 と、インダクタンス可変手段 6 を構成する図示省略のコアの役割について簡単に説明する。

加速空洞本体 5 0 内に装荷された加速コア 1 は、加速電極ギャップ 2 に誘導電界を発生させるための交流磁束の媒体であり、荷電粒子ビーム B と鎖交しなければならない。すなわち、荷電粒子ビーム B を鎖交するコアに発生した磁束がビーム B を加速する電界を生成する。この際、インダクタンス可変手段 6 を用いて加速空洞本体 5 0 のインダクタンスを変化させれば、コアの透磁率を変化させる必要がないため、動作領域を 0 から飽和磁束密度までフルに利用できる。すなわち、比較的飽和磁束の小さいコア材料でも、十分大きな動作領域を確保することができるため、コア材料に対する制限が大幅に緩和される。

30

一方、インダクタンス可変手段 6 は、加速電極ギャップ 2 のキャパシタンス C との L C 共振周波数を調整するために存在し、ビーム B の加速には寄与しない。このため、Q 値の高いコア材を用いて、加速空洞本体 5 0 のインピーダンスの低下を抑制するのが望ましい。また、ビーム B と鎖交するという条件がないため、インダクタンスを変化させる様々な手法が可能となる。さらに、形状や図示省略したコイルの巻き数を自由に選べるため、インダクタンス可変手段 6 に用いるコア材質に対する制限が大幅に緩和される。

以上のように、加速空洞本体 5 0 の加速電極ギャップ 2 に並列にインダクタンス可変手段 6 を設けることにより、加速空洞本体 5 0 のインピーダンスを高く出来るとともに、加速コア 1 のコア材およびインダクタンス可変手段 6 のコア材に要求される条件が大幅に緩和される。

40

【 0 0 3 3 】

以上、インダクタンス可変手段 6 を並列に負荷した R F 加速空洞 1 0 0 の特性向上について述べたが、次にインダクタンス可変手段 6 の実施例を図 2 に基づいて説明する。通常一般に、インダクタンスを可変するための手法としては、大きく分けて磁気抵抗を変化させる方法と、コア透磁率を変化させる方法とがあり、前者は例えばギャップ付コアのギャップを変化させる方法であり、後者は従来例でも示したバイアス磁場を変化させる方法に相当する。この実施例では、磁気抵抗を変化させる構成を採用している。

【 0 0 3 4 】

50

図2は前記図1に示したインダクタンス可変手段6の詳細図である。インダクタンス可変手段6はトロイダルコア7と平板状トロイダル磁性体8と、この平板状トロイダル磁性体8を制御、回転駆動する回転駆動機構9によって構成される。トロイダルコア7は図示省略のコイルを有すると共に例えば、フェライト等の磁性体が用いられ、外半径 r_2 、内半径 r_1 を有するとともに、図2に示すように周方向に1個所ギャップ長 a のギャップ7aが設けられている。平板状トロイダル磁性体8は外半径 r_4 、内半径 r_3 を有するドーナツ状をなし、例えばフェライト等の渦電流損の少ない μ_p 、 Qf 値の高いトロイダル磁性材8aと、セラミック系のトロイダル非磁性材8bとは、板厚方向において所定の角度傾斜したテーパ面8cが形成されているとともに、互いにテーパ面8cで接着して構成されている。トロイダル磁性材8aは厚肉部で t_{a1} 、薄肉部で t_{a2} 、トロイダル非磁性材8bのそれは t_{b1} 、 t_{b2} を有し、接着後の厚さ t は、 $t = t_{a1} + t_{b2}$ あるいは $t = t_{a2} + t_{b1}$ である。

10

前記平板状トロイダル磁性体8の厚さ t は前記トロイダルコア7のギャップ7aのギャップ長 a より小さい。またトロイダル磁性材8のY軸はトロイダルコア7のY軸に並行に設けられ、例えばモータによる駆動機構9によって図示のように回転する。なお、トロイダルコア7の幅 $W_7 = r_2 - r_1$ と、トロイダル磁性体8の幅 $W_8 = r_4 - r_3$ との関係は $W_7 = W_8$ 、 $W_7 > W_8$ または $W_8 > W_7$ のいずれかが選択される。なお、テーパ形状を有することによるテーパ先端部の過熱は平板状トロイダル磁性体が回転することによる空冷効果により低減させることができる。

【0035】

20

次に磁気抵抗を変化させる方法について説明する。まず、基本となるトロイダルコア7のインダクタンスを求める。内径 r_1 、外径 r_2 のトロイダルコア7の平均磁路長 m と、磁気抵抗 R_m 、及び N 回巻きコイルのコアのインダクタンス L は、次の数式6で表される。ここで、磁路長は、コア中の磁束の平均的な長さは、 μ_r 比透磁率、 μ_0 は真空の透磁率である。

【0036】

【数6】

$$\begin{aligned} m &= \pi (r_1 + r_2) \\ R_m &\doteq m / (\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S) \\ L &= N^2 / R_m \end{aligned}$$

30

【0037】

次に、このコアの一部を切り欠き、ギャップ長 a を設けた場合のインダクタンスを求める。ギャップを含む磁気抵抗 R_{mg} は、次の数式7のように変化する。

【0038】

【数7】

$$\begin{aligned} R_{mg} &= \frac{a}{\mu_0 S} + \frac{m-a}{\mu_r \mu_0 S} = \frac{a}{\mu_0 S} \left(\frac{m}{a} - 1 + \mu_r \right) \\ R_{mg} &\approx \frac{a}{\mu_0 S} \quad \left(\frac{m}{a} \ll \mu_r \right) \\ R_{mg} &\approx \frac{m}{\mu_r \mu_0 S} \quad \left(\frac{m}{a} \gg \mu_r \right) \end{aligned}$$

40

【0039】

50

図 2 に示すようにトロイダル磁性体 8 をトロイダルコア 7 のギャップ 7 a 間で図示省略の制御手段を介し、駆動機構 9 によって回転させると、トロイダルコア 7 とトロイダル磁性材 8 a 間のギャップが連続的に変化して、磁気抵抗が変化し、可変インダクタンスとなる。その際、円形加速器、例えばイオンシンクロトロン内に設置された RF 加速空洞 100 を荷電粒子ビーム加速周波数の変化パターンに合わせて、インダクタンスが同様の变化となるように、トロイダル磁性体 8 を回転駆動するモータを制御、回転しトロイダル磁性材 8 a の形状をトロイダルコア 7 に対して変化させることにより、加速周波数の変化パターンに合わせた同調が可能となる。なおトロイダル非磁性材 8 b は回転のバランスとしての構成要素をなし、同程度の重さを有するものでも良いが、より厳密なバランス調整を行う場合は、トロイダル磁性材 8 a より若干重く作り、穿孔により回転バランスを合わせてもよい。

なお、この実施の形態 1 では加速電極ギャップ 2 のキャパシタンス C と並列に可変手段インダクタンス 6 を入れた例を示したが、図 3 (a) に示すように、可変インダクタンス成分をもつインピーダンス 6 a でも同様の効果を奏する。また、図 1 (a) に示した加速電極ギャップ 2 間に電極板を設けることによって図 3 (b) に示すように、キャパシタンス C を 2 分割した C_1 と C_2 とし、その一部に可変インダクタンス L_v またはインピーダンス Z を入れてもよい。

【 0 0 4 0 】

また、平板状トロイダル磁性体は磁性材と非磁性材とをテーパ面で一体化した構成を示したが、テーパに限らず例えば階段形状であってもよい。またさらに、加速電極ギャップ 2 は 1 段設ける例を示したが、2 段以上の多段であってもよい。

【 0 0 4 1 】

実施の形態 2 .

この実施の形態 2 では、実施の形態 1 で示した実施例と同様、磁気抵抗を変化させてインダクタンスを変化させる方法を、図 4 について説明する。この構成では、ドーナツ状のコアを半分割し、その一方を固定側とし、他の片側を回転させて磁極ギャップを変化させたインダクタンス可変手段 6 a を実現している。

図 4 においてインダクタンス可変手段 6 a は、磁性材を用いたドーナツ状コアを半分割した半円状トロイダル固定コア 10 (コイルは図示省略)。このトロイダル固定コア 10 と同軸上 (X - X 軸上) で回転可能なドーナツ状コアを半分割した半円状トロイダル回転コア 11 と、この半円状トロイダル回転コア 11 を回転駆動する回転駆動機構 9 とより構成されている。なお、半円状トロイダル固定コア 10 の端部 10 E と、半円状トロイダル回転コア 11 の端部 11 E 間には、ギャップ長 a の磁極ギャップが設けてある。

このような構成のインダクタンス可変手段 6 a は半円状トロイダル固定コア 10 と半円状トロイダル回転コア 11 との間の磁極ギャップ a の変化を大きくできるため、比較的 μ_r の低い、例えばフェライト材でも数式 7 の ($m / a \ll \mu_r$) の条件を満たすことができる。

この形状で加速周波数変化パターン (インダクタンス変化パターン) を所望の形状にするためには、半円状トロイダル固定コア 10 の端面 10 F に適当な磁極シムを取り付ければよい。

尚、この図 4 では、回転軸は横向きになっているが、垂直 (磁極吊り下げがベター) にした方が、軸に重力による曲げ応力が生じず、滑らかな運転が可能となる。

また、この形状を有するインダクタンス可変手段 6 a においても、回転時の回転バランス、及び、空気抵抗を改善するため、図 5 に示すように外形が回転対称になるようなセラミック等の非磁性半球状回転バランス 12 をトロイダル回転側コア 11 に設けたインダクタンス可変手段 6 b とすると滑らかな回転を得ることが出来る。

【 0 0 4 2 】

実施の形態 3 .

次に実施の形態 3 について述べる。円形加速器、例えばイオンシンクロトロンの荷電粒子加速周波数の繰り返し周波数が 100 Hz を越えるような場合には、前記実施の形態 1

、2に示したコアの回転による磁極ギャップの変化を得る構成は、回転駆動機構9の回転数上限の関係から実現が難しくなる。この課題を解決するため、実施の形態1の図2の平板状トロイダル磁性体8に代替して、1回の回転で複数の磁気抵抗変化が発生するような平板状トロイダル磁性体を設けたインダクタンス可変手段とすればよい。図6にこの実施の形態3によるインダクタンス可変手段6cを示す。図6において、トロイダルコア7は前記図2と同様である。平板状トロイダル磁性体8は、図1に示した平板状トロイダル磁性体8と同一の大きさの外半径 r_4 、内半径 r_3 、厚さ t を有したドーナツ状をなしている。この平板状トロイダル磁性体8はフェライト等の磁性体8aとセラミック系の非磁性材8bとで構成されており、磁性材8aと非磁性材8bとがドーナツ状円周方向で交互に複数の鋸歯形状8dを周方向に順次周期的に組み合わせ形成して接着されている。図6に示す例の平板状トロイダル磁性体8は4個の鋸歯形状8dを備えているが、この数に限るものではない。

10

このような構成のインダクタンス可変手段6cにおいて、回転駆動機構9によって平板状トロイダル磁性体8を回転させると、円形加速器の加速周波数の変化パターンと同じ磁気抵抗の変化パターン(インダクタンス変化パターン)、つまり加速周波数変化パターンに合わせたRF加速空洞50と同調が可能となる。

【0043】

実施の形態4 .

実施の形態4を図7に基づいて説明する。この実施の形態4は、前記した実施の形態2の図4に示したインダクタンス可変手段6aのトロイダル回転コア11に代替して、多極

20

図7において、多極トロイダル回転コア11はドーナツ状コアを半分割したトロイダル回転コア11a、11bとが十文字状に接着されている。このような多極トロイダル回転コア11を回転駆動機構9によって回転させることにより、加速周波数の変化パターンに合わせたインダクタンス変化パターンがより容易に得られる。なお、このインダクタンス変化パターンの微調整は、固定コア10の端部10Eの磁極形状を変更する。例えば適当な磁極シムを取り付ければよい。

【0044】

実施の形態5 .

次に実施の形態5について述べる。この実施の形態5によるインダクタンス可変手段6

30

は、図8(a)(b)に示すように固定インダクタンス13を加速電極ギャップ2に並列にかつ加速空洞本体50の外部に外付けコアとして設けた構成である。なお、この構成が有利になる条件は以下の通りである。

1. 高い加速電圧を必要とするため、励磁磁束を大きくしたい。しかも、加速コアの設置スペースに制限があり、磁束密度を上げるため、高い飽和磁束密度を持つ加速コアが必要。

2. 加速周波数帯域が狭く、RF加速空洞の $Q = 3 \sim 9$ 程度まで許容。

従来は特許文献3に示したように、同様の条件のRF加速空洞を実現するため、加速コアにギャップを設け、ギャップ幅を調整することで加速コアのインダクタンスを下げ、ある共振周波数におけるシャントインピーダンスを大きくすると共に、Q値の調整を行って

40

この実施の形態5では前述した特許文献3の課題を解決するものであり、図8に示すように、加速電極ギャップ2に並列に固定インダクタンス13を接続することで、加速コアにギャップを設けると同等の効果を得ることができる。このように固定インダクタンス13を用いる場合は、加速コアにギャップを設ける必要がなく、かつ、インダクタンスを可変にする必要がないので、安価にRF加速空洞100を製作することができる。

【0045】

以下、この実施の形態5による本構成の動作を試算例を基に説明する。

加速コア1のインピーダンスを $Z_1 = R_1 + iX_1$ 、外付けコア13のインピーダンスを $Z_2 = R_2 + iX_2$ とする。このとき、2つのコアの並列インピーダンス $Z_3 = R_3 +$

50

i X_3 の各成分は下記数式 8 となる。

【 0 0 4 6 】

【 数 8 】

$$R_3 = \frac{R_1(R_2^2 + X_2^2) + R_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \frac{R_1|Z_2|^2 + R_2|Z_1|^2}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

$$X_3 = \frac{X_1(R_2^2 + X_2^2) + X_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \frac{X_1|Z_2|^2 + X_2|Z_1|^2}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

10

【 0 0 4 7 】

これより、 $Q = X_3 / R_3$ は、次式となる。

【 0 0 4 8 】

【 数 9 】

$$Q = \frac{X_3}{R_3} = \frac{X_1|Z_2|^2 + X_2|Z_1|^2}{R_1|Z_2|^2 + R_2|Z_1|^2}$$

20

【 0 0 4 9 】

ここで、代表的な例について、並列に設けた固定インダクタンス（外付け）1 3 の効果を試算してみる。まず、 Z_1 として、MA コア材料を想定し $Q_1 = 0.5$ 、 Z_2 として、フェライトを想定し、 $Q_2 = 20$ とする。さらに、外付けコア 1 3 のインピーダンスのインダクタンス成分を加速コア 1 の半分とすれば、下式が得られる。

【 0 0 5 0 】

【 数 1 0 】

$$R_1 = 2 \cdot X_1$$

$$R_2 = 0.05 \cdot X_2$$

$$X_2 = 0.5 \cdot X_1$$

$$R_3 = 0.43 \cdot X_1$$

$$X_3 = 0.099 \cdot X_1$$

$$Q = 4.4$$

30

【 0 0 5 1 】

並列に設けた固定インダクタンス 1 3 の付加効果を見るためには、並列接続形式に変換した方が便利であるため、MA コア材料単体（ Z_1 ）、及び固定インダクタンス付加時（ Z_3 ）のインピーダンスを、数式 2 を用いて変換し、数式 7 を代入すると、以下が得られる。

40

【 0 0 5 2 】

【数 1 1】

$$\begin{aligned}
 Z_{p1} &= R_{p1} + iX_{p1} \\
 Z_{p3} &= R_{p3} + iX_{p3} \\
 X_{p1} &= 5 \cdot X_1 \\
 X_{p3} &= 0.46 \cdot X_1 \\
 X_{p3} &= 0.091 \cdot X_{p1} \\
 R_{p1} &= 2.5 \cdot X_1 \\
 R_{p3} &= 2 \cdot X_1 \\
 R_{p3} &= 0.8 \cdot R_{p1}
 \end{aligned}$$

10

【0053】

一方、RF加速空洞100のインダクタンスは、共振周波数と加速電極ギャップ2のキャパシタンスCにより、一意に定まるため、インダクタンスが同じになるように調整する必要がある。この例では、RF加速空洞100のインダクタンスが0.091倍になっているから、外付けインダクタンス12のコア厚を1/0.091倍にする等の方法で、同じインダクタンスになるように調整する。この調整により、シャントインピーダンスも1/0.091倍される。

20

結局、RF加速空洞100のインピーダンス Z'_{p3} は次式となる。

【0054】

【数 1 2】

$$\begin{aligned}
 Z'_{p3} &= R'_{p3} + iX'_{p3} \\
 X'_{p3} &= X_{p1} \\
 R'_{p3} &= 8.8 \cdot R_{p1}
 \end{aligned}$$

【0055】

すなわち、この実施の形態5では、加速電極ギャップ2に適正に選定された寸法を有する並列に固定インダクタンス13を付加することにより、シャントインピーダンスが8.8倍となり、Q値が0.54.4と大きくなることがわかる。

30

これは例えば前記特許文献3に示されるコアにギャップを設ける効果と同等であり、コアを切断する必要がない分だけ、安価に空洞を構成できる。

【0056】

実施の形態6.

次に実施の形態6のインダクタンス可変手段6eを図9に基づいて説明する。

以上の実施の形態では、構造的、機構的にインダクタンスを変化させる場合であったが、この実施の形態6では、回路的にインダクタンスを変化させるものである。

図9に示すように、加速電極ギャップ2に並列に、例えばトロイダル状の空洞コア17が加速空洞本体50の外部に設けられているとともに、この空洞コア17に可変定電流電源16が設けられている。この可変定電流電源16を荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせてONすることによって空洞コア17インダクタンスを変化させるものである。

40

実施の形態1で説明したように、フェライトの特性は熱的に不安定なため、バイアス電流によるインダクタンス調整が難しい。しかし、この実施の形態6の図9に示す外付けインダクタンスに相当する空洞コアは設置場所に制約されることなく、また空洞外壁3を取り巻く必要がなく、サイズも自由に選べるため、冷却システムを容易に構成することができる。例えば、空洞コアのコア自体を冷媒に浸して液冷する構成も、簡単に実現することができ、熱的な安定性を向上させることができる。

50

さらに、加速コア 1 として Q 値の低いコア ($Q = 0.5$) を用いる場合、数式 10 に示されるように、 $Q = 20$ というロス小さいフェライトを選んでも、RF 加速空洞 100 全体としては $Q = 4.4$ 程度となり、共振の鋭さが小さくなる。別の言い方をすれば、パワーロスの小さい (Q 値の大きい) フェライトを使用し、フェライトの発熱を抑制して温度変動を抑制すると共に、共振の鋭さを小さくして共振の安定性を向上させることによりこの実施の形態 6 における本方式の共振の不安定性を大幅に抑制することが可能となる。

なお、前記加速コア 2 材の Q 値 (μ_p, Q_f) と、インダクタンス可変手段の磁性材の Q 値が異なる材質であり、かつ前記加速コア材の Q 値が前記インダクタンス可変手段の磁性材の Q 値より小さいように選定するのは前記実施の形態 1 ~ 5 および後述の実施の形態 7 に適用されるとその効果が一層向上するものである。

10

【0057】

実施の形態 7 .

実施の形態 7 を図 10 に基づいて説明する。この実施の形態 7 のインダクタンス可変手段 6 f はインダクタンスを段階的に変化させて概同調させるものである。Q 値が ~ 5 程度の RF 加速空洞なら、共振周波数 f (数 MHz を想定) に対し、 $f \pm 0.25$ MHz 程度まで、共振時の 90% のインピーダンスを維持する。一方、通常の加速器における加速周波数の変化幅は、1 ~ 5 MHz 程度である。これより、5 MHz の加速周波数変化幅がある場合には、インダクタンスを 10 回離散的に変化させれば連続的に同調させた場合の 90% のインピーダンスを維持することになる。

次に、インダクタンスを段階的に変化させる構成を図 10 について説明する。図 10 に示すように加速電極ギャップ 2 に並列に接続された、例えば 3 個の外付けインダクタンスに相当する空洞コア 17 a、17 b、17 c とそのそれぞれに接続された可変定電流電源 16 a ~ 16 c およびスイッチ 20 a ~ 20 c が設けられている。スイッチ 20 a ~ 20 c の加速周波数の変化パターンに合わせて ON されることにより空洞コアにバイアス電流が流れるように構成されている。但し、バイアス電流は ON、OFF の 2 つのモードしかなく、ON の場合には、外付けインダクタンス 17 a ~ 17 c のコアが飽和し、透磁率が 1 に近い値になる。

20

このような構成を採用することで、空洞コアである外付けインダクタンス 17 a ~ 17 c の数が 1、2、3 と変化し、インダクタンスを 3 倍変化させることが出来る。なお、空洞コアの数を 3 個としたが、これに限るものではない。

30

【0058】

なお、外付けインダクタンス 17 a ~ 17 c は、図 11 に示すように単に加速電極ギャップ 2 に並列に接続され、回路上の隣接する空洞コア間、図 11 では 17 a と 17 b、17 b と 17 c 間にスイッチ 20 a、20 b を設け図示省略の制御手段の信号により前記スイッチを ON させる構成であってもよい。

【0059】

実施の形態 8 .

以上では、空洞のギャップに並列に設けたインダクタンスを、可変インダクタンスとして説明してきたが、固定インダクタンスを用いれば、空洞を、加速周波数帯域を狭く、高インピーダンスをもつ特性に変化させることができる。これは、特許文献 3 と同じ目的で、並列固定インダクタンスを調整することで、RF 加速空洞の Q 値を任意に調整できることを意味しており、同様のアプリケーションでは、コアの切断やギャップ調整機構を用いることなく、安価に Q 値の調整が可能である。

40

【0060】

実施の形態 9 .

以上述べた実施の形態 1 ~ 8 の構成を備えた RF 加速空洞 100 は、荷電粒子ビーム加速あるいは蓄積する円形加速器に適用すると、簡単な制御によって加速周波数と RF 加速空洞との共振周波数の同調が容易に行うことができる。その結果、加速電圧の上昇、加速の安定性、加速エネルギーやビーム電流値の上昇、さらには円形加速装置のコンパクト化等優れた効果を奏する。

50

【産業上の利用可能性】

【0061】

この発明の活用例として、荷電粒子を加速あるいは蓄積する円形加速器の高周波加速空洞に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0062】

【図1】この発明の実施の形態1によるRF加速空洞の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図2】この発明の実施の形態1によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図3】この発明の実施の形態1によるインダクタンス可変手段の配置を示す図である。

10

【図4】この発明の実施の形態2によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図5】この発明の実施の形態2によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図6】この発明の実施の形態3によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図7】この発明の実施の形態4によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図8】この発明の実施の形態5によるRF加速空洞の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図9】この発明の実施の形態6によるRF加速空洞の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図10】この発明の実施の形態7によるRF加速空洞の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

20

【図11】この発明の実施の形態7によるRF加速空洞の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図12】従来のRF加速空洞の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図13】フェライトのB-H曲線を示す概略図である。

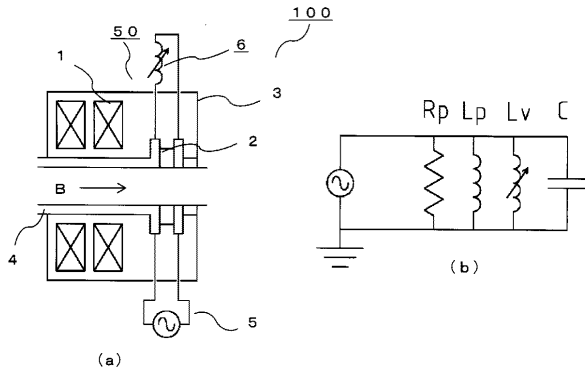
【符号の説明】

【0063】

1 加速コア、2 加速電極ギャップ、6, 6a~6f インダクタンス可変手段、
7 トロイダルコア、8 平板状トロイダル磁性体、8a トロイダル磁性材、
8b トロイダル非磁性材、9 回転駆動機構、10 半円状トロイダル固定コア、
11 半円状トロイダル回転コア、12 半球状バランス、
13 外付けコア(固定インダクタンス)、16a~16c 可変定電流電源、
17a~17c 空洞コア、20a~20c スイッチ、50 加速空洞本体、
100 RF加速空洞。

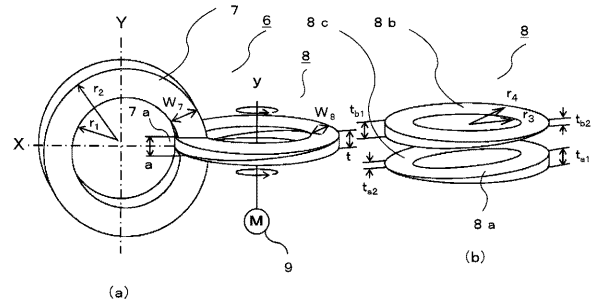
30

【 図 1 】



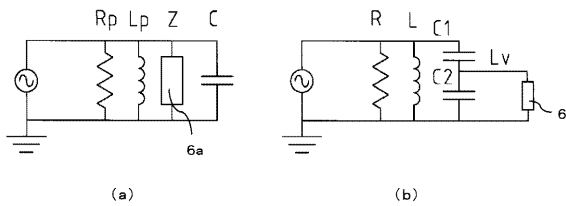
- 1: 加速コア
- 2: 加速電極ギャップ
- 3: 空洞外壁
- 4: 真空ダクト
- 5: 高周波電源
- 6: インダクタンス可変手段
- 50: 加速空洞本体
- 100: RF加速空洞

【 図 2 】



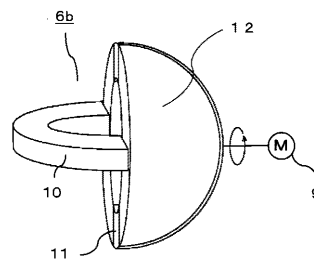
- 6: インダクタンス可変手段
- 7: トロイダルコア
- 7a: ギャップ
- 8: 平板状トロイダル磁性体
- 8a: トロイダル磁性材
- 8b: トロイダル非磁性材
- 8c: テーパ面
- 9: 回転駆動機構
- a: ギャップ長
- r₁: トロイダルコアの内半径
- r₂: トロイダルコアの外半径
- r₃: トロイダル磁性体の内半径
- r₄: トロイダル磁性体の外半径
- t: トロイダル磁性体の厚さ
- W₇: トロイダルコアの幅
- W₈: トロイダル磁性体の幅

【 図 3 】



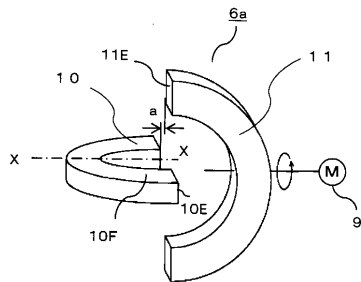
6a: インピーダンス

【 図 5 】



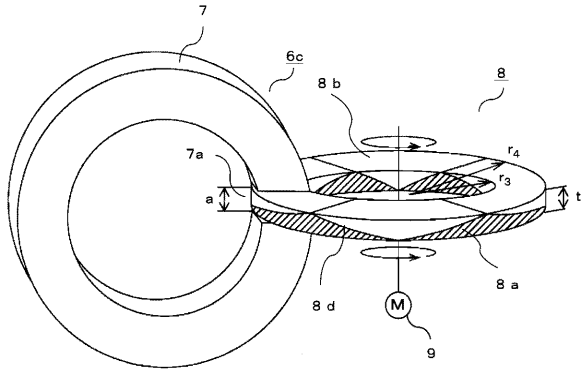
- 6b: インダクタンス可変手段
- 12: 非磁性半球状回転バランス

【 図 4 】



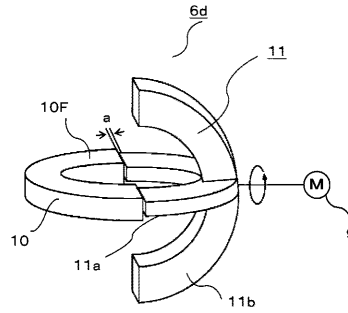
- 6a: インダクタンス可変手段
- 10: 半円状トロイダル固定コア
- 11: 半円状トロイダル回転コア
- 10E: 端部
- 10F: 端面
- 11E: 端部

【 図 6 】



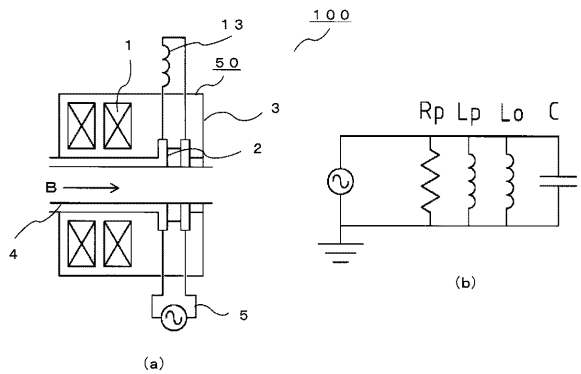
6c: インダクタンス可変手段
 8d: 鋸歯形状

【 図 7 】



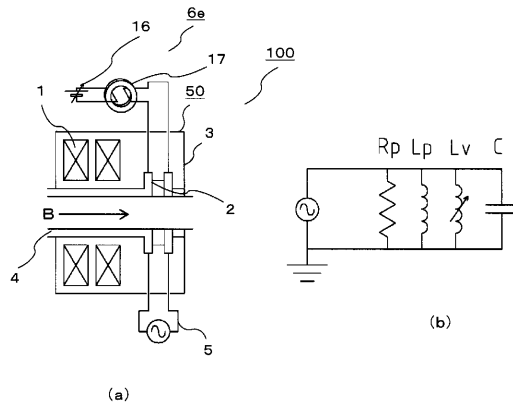
6d: インダクタンス可変手段
 11: 多極トロイダル回転コア
 11a: 半円状トロイダル回転コア
 11b: 半円状トロイダル回転コア

【 図 8 】



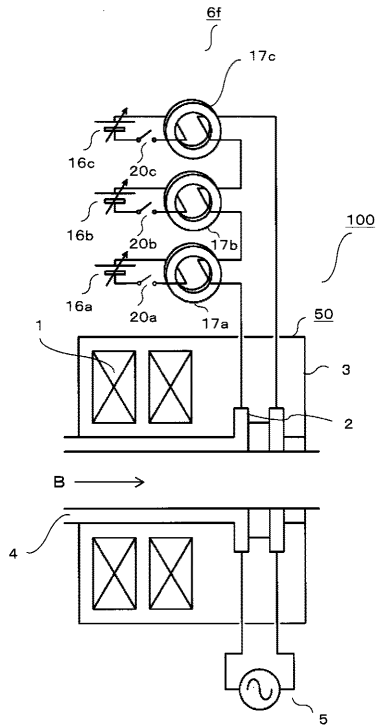
13: 外付けコア(固定インダクタンス)

【 図 9 】



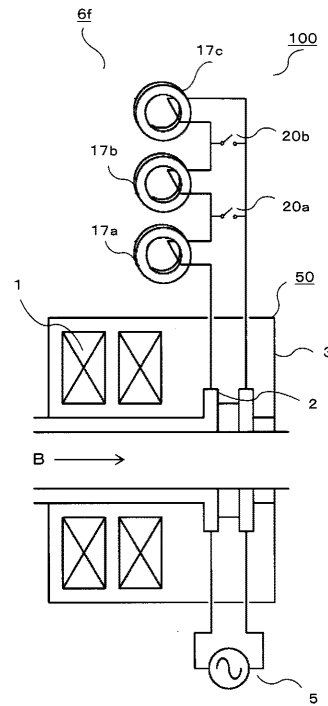
16: 可変定電流電源
 17: 空網コア
 6e: インダクタンス可変手段

【 図 1 0 】

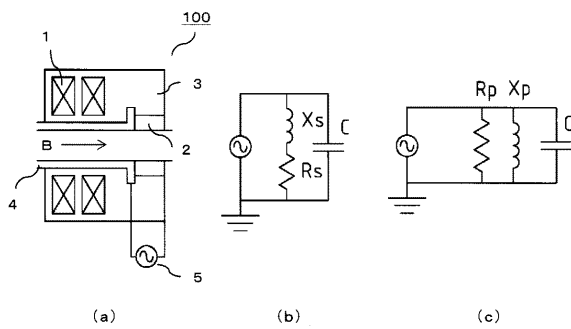


16a~16c: 可変定電流電源
 17a~17c: 空胴コア
 20a~20c: スイッチ
 6f: インダクタンス可変手段

【 図 1 1 】

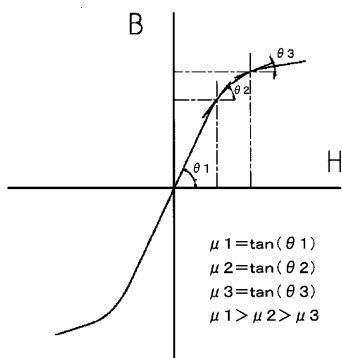


【 図 1 2 】



100: RF加速空洞

【 図 1 3 】



【手続補正書】

【提出日】平成18年12月27日(2006.12.27)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積する円形加速器に用いられる高周波加速空洞であって、前記高周波加速空洞は、前記荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップおよび前記荷電粒子ビームの軌道を取りまく磁路を形成する加速コアが設けられた加速空洞本体と、前記加速電極ギャップに並列に接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段とを備えており、前記荷電粒子を加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする高周波加速空洞。

【請求項2】

前記インダクタンス可変手段は、周方向にギャップが設けられたトロイダルコアと、該トロイダルコアと直交し、回転中心が前記トロイダルコア外周より離れた個所に配置された平板状トロイダル磁性体と、該平板状トロイダル磁性体の回転駆動機構とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて、前記平板状トロイダル磁性体が前記回転駆動機構によって回転駆動され、前記トロイダルコアのギャップ内を回転通過して前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項1に記載の高周波加速空洞。

【請求項3】

前記平板状トロイダル磁性体は、トロイダル磁性材とトロイダル非磁性材とで構成されており、前記トロイダル磁性材およびトロイダル非磁性材はともに、板厚方向において所定の角度傾斜したテーパ面が形成されているとともに、該テーパ面を互いに接するよう組み合わせ合わせて一体化し、平板状トロイダル磁性体が形成されていることを特徴とする請求項2に記載の高周波加速空洞。

【請求項4】

前記平板状トロイダル磁性体は、トロイダル磁性材とトロイダル非磁性材とで構成されており、前記トロイダル磁性材およびトロイダル非磁性材はともに、トロイダル周方向に複数個分割されているとともに、板厚方向の断面形状が鋸歯状をなし、前記トロイダル磁性材の鋸歯状の山と谷が、前記トロイダル非磁性材の谷と山とに周方向に順次周期的に互いに組み合わせられて一体化し、平板状トロイダル磁性体が形成されていることを特徴とする請求項2に記載の高周波加速空洞。

【請求項5】

前記インダクタンス可変手段は、半円状トロイダル固定コアと、該半円状トロイダル固定コアと所定のギャップ長を介するとともに、同軸上で回転可能に配置された半円状トロイダル回転コアと、該半円状トロイダル回転コアの回転駆動機構とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記回転駆動機構によって前記半円状トロイダル回転コアが回転駆動され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項1に記載の高周波加速空洞。

【請求項6】

前記半円状トロイダル回転コアには、該半円状トロイダル回転コア全体を覆う非磁性材の

半球状回転バルンサが設けられていることを特徴とする請求項 5 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 7】

前記インダクタンス可変手段は、半円状トロイダル固定コアと、該半円状トロイダル固定コアに所定のギャップ長を介するとともに同軸上に回転可能に配置され、2個の半円状トロイダル回転コアが互いに90°直交して形成された多極トロイダル回転コアと、該多極トロイダル回転コアの回転駆動機構とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記回転駆動機構によって前記多極トロイダル回転コアが回転駆動され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 8】

荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積する円形加速器に用いられる高周波加速空洞であって、前記高周波加速空洞は前記荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップおよび前記荷電粒子ビーム軌道を取りまく磁路を形成する加速コアが設けられた加速空洞本体と、前記加速電極ギャップに並列に接続された固定インダクタンスとを備えており、前記固定インダクタンスの寸法を選定することにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする高周波加速空洞。

【請求項 9】

前記インダクタンス可変手段は、空洞コアと可変定電流電源とで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記可変定電流電源によって前記空洞コアにバイアス磁界が印加され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 10】

前記インダクタンス可変手段は、複数の空洞コアが直列に設けられ、該空洞コアにそれぞれ設けられた可変定電流電源およびスイッチとで構成されており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記各スイッチがONされることにより、前記空洞コアにバイアス磁界が印加され、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 11】

前記インダクタンス可変手段は、複数の空洞コアが直列に設けられ、前記複数の空洞コアの隣り合う空洞コア間の回路上にはスイッチが設けられており、前記荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて前記スイッチがONされ、前記インダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、前記荷電粒子ビームの加速周波数と前記高周波加速空洞の共振周波数とを同調させることを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 12】

前記加速コア材の $\mu_p Q f$ 値と、前記インダクタンス可変手段の磁性材の $\mu_p Q f$ 値とが異なり、かつ、前記加速コア材の $\mu_p Q f$ 値が前記インダクタンス可変手段の磁性体の $\mu_p Q f$ 値より小さいことを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 13】

前記加速コア材の $\mu_p Q f$ 値と、前記固定インダクタンスの磁性材の $\mu_p Q f$ 値とが異なり、かつ、前記加速コア材の $\mu_p Q f$ 値が前記固定インダクタンスの磁性体の $\mu_p Q f$ 値より小さいことを特徴とする請求項 8 に記載の高周波加速空洞。

【請求項 14】

荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積する円形加速器に用いられる高周波加速空洞であって、前記高周波加速空洞は、前記荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップおよび前記荷電粒子ビームの軌道を取りまく磁路を形成する加速コアとが設けられた加速空洞本体と、前記加速電極ギャップに並列に接続されたインダクタンスとを備えることを特徴とする高周波加速空洞。

【請求項 15】

請求項 1、8、14 のいずれか 1 項に記載の前記高周波加速空洞を備え、荷電粒子ビームを加速あるいは蓄積することを特徴とする円形加速器。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は円形荷電粒子加速器に用いられる高周波加速空洞およびこの高周波加速空洞を用いた円形加速器に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来より荷電粒子を加速する円形加速器に用いられている高周波加速空洞にはよく知られているように同調型高周波加速空洞（以下、同調型 R F 加速空洞と称す）と、非同調型高周波加速空洞（以下、非同調型 R F 加速空洞と称す）とがある。これらの高周波加速空洞（以下、R F 加速空洞と称す）を用いた、例えばイオンシンクロトロンにおいて、イオンを加速しようとするときイオンがシンクロトロン内を周回する際の周回周波数と等しい高周波を高周波電源から R F 加速空洞に印加しなければならない。

前記同調型 R F 加速空洞は、空洞の共振周波数を高周波電源の印加周波数に同調させて、必要な加速電圧を発生させる。一方、非同調型 R F 加速空洞は、予め加速周波数の全範囲で空洞のインピーダンスを必要な値まで上げておく。

【0003】

前記同調型 R F 加速空洞において、印加周波数と R F 加速空洞の共振周波数との共振周波数制御をシーケンス制御で行うために、R F 加速空洞内に透磁率の虚数部の大きいフェライトを装荷し、R F 加速空洞の Q 値（共振周波数に対する共振幅の比）を低下させ、前記フェライトの透磁率を調節するための磁場を発生させるバイアスコイルを装荷し、バイアスコイルの作る磁場の強さによって、フェライトの透磁率の実数部分を変化させ、R F 加速空洞内に励起される電磁場の共振周波数を制御することが示されている（例えば、特許文献 1）。

【0004】

一方、前記非同調型 R F 加速空洞において、加速周波数範囲で一定のインピーダンスをもつことを実現するために、ジュール損の大きいフェライトを R F 加速空洞内に装荷し、フェライトによるインピーダンスを大きくし、シャント抵抗をフェライトに並列接続した構成で、フェライトによる抵抗値 Z_{fer} が低い周波数領域では抵抗値の大きなシャント抵抗を接続し、抵抗値 Z_{fer} が大きい周波数領域では抵抗値の小さなシャント抵抗に接続を切り替えることが示されている（例えば、特許文献 2）。

【0005】

またさらに非同調型 R F 加速空洞において、R F 加速空洞の Q 値を任意に調整することでビームローディング（イオンビームが R F 加速空洞に及ぼす影響）を低減させ、均一にビームを加速することを目的として、フェライトを用いた加速コアを中心軸を含む平面によって複数に分割することが示されている（例えば、特許文献 3）。

【0006】

- 【特許文献1】特開平07-006900号公報
【特許文献2】特開平07-161500号公報
【特許文献3】特開2001-126900号公報
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら前記特許文献1のRF加速空洞では、フェライトに直流バイアスをかけフェライトコアの飽和磁界の近傍で使用する必要があるため、RF加速空洞に大きな高周波磁界を印加できないという問題点や、またフェライトの冷却構造がなされなくフェライトのインダクタンスが温度上昇による影響を受けやすく、安定した制御が得にくいという問題点を有している。

また、前記特許文献2のRF加速空洞では、共振点を加速周波数帯域に設定するために、加速コアのインピーダンスを自由に選ぶことができず、RF加速空洞のインピーダンスを十分に大きくできないという問題点を有している。さらに前記特許文献3の高周波加速空洞では、大型コアの場合、コア切断コストが上昇し、また切断面端部の磁界集中による発熱などの問題点を有している。

【0008】

この発明は前記のような課題を解決するために為されたものであって、空洞本体の加速電極ギャップに並列にインダクタンス、もしくはインダクタンス可変手段を設け、加速コアとインダクタンス可変手段の磁性材とで合成されるインダクタンスと、加速電極ギャップのキャパシタンスとを共振させ、高いインピーダンスの高周波加速空洞およびこの高周波加速空洞を用いた円形加速器を得るものである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

この発明に係る高周波加速空洞は、荷電粒子ビームを加速するための高周波電界を発生する加速電極ギャップと、荷電粒子ビーム軌道を取りまく磁路を形成する加速コアとが設けられた加速空洞本体と、加速電極ギャップに並列に接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段とを備えており、荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせてインダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを変化させることにより、荷電粒子ビームの加速周波数と高周波加速空洞の共振周波数とを同調させるものである。

【発明の効果】

【0010】

この発明の高周波加速空洞は、加速電極ギャップに並列に接続された磁性体を有するインダクタンス可変手段の生成するインダクタンスを、荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて変化させることにより、荷電粒子ビームの加速周波数と高周波加速空洞の共振周波数とを同調させるので、加速空洞のインピーダンスを高くでき、加速コアに必要な条件が緩和され、かつ簡単な構成で同調がとれるという効果がある。

【発明を実施するための最良の形態】

【0011】

本発明の各実施の形態の説明に入る前に、本発明の構成および動作をより理解しやすくするために、まず加速コアと加速電極ギャップで構成される従来型のRF加速空洞の動作を図12に基づいて説明する。

図12(a)に示すRF加速空洞100は、加速コア1と加速電極ギャップ2、空洞外壁3、真空ダクト4と、高周波電源5とで構成されている。このような構成であって、数MHz程度の周波数帯域で駆動されるRF加速空洞100は、サイズに比較して高周波数の波長が長いため、その動作はほぼ電気回路モデルで解析することができる。図12(b)はRF加速空洞100を電気回路でモデル化したものを示す。図12(b)のインダクタンス X_s と抵抗 R_s の直列接続がRF加速空洞100に設けられた加速コア1を、キャ

パシタンスCが加速電極ギャップ2を表している。加速コア1が抵抗成分R_sを有しているのは、加速コア1の励磁に伴う発熱(コアロス)が、回路で表現すると抵抗に相当するからである。コアロスを含めた加速コア1のインピーダンスZは、複素透磁率μ(=μ' - jμ'')を用いて(μ'は透磁率の実数部、μ''は透磁率の虚数部)次の数式1によって示される。

【0012】

【数1】

$$\begin{aligned} Z &= j\omega\mu L_0 \\ &= j\omega\mu' L_0 + \omega\mu'' L_0 \\ &= j\omega L_s + R_s \\ &= jX_s + R_s \end{aligned}$$

【0013】

となる。ここでωは角周波数(加速周波数をfとすると、ω=2πf)、L₀は加速コア1のインダクタンス成分、R_sは加速コア1の抵抗成分、jX_sはインピーダンスの虚数部である。図12(b)に示したこのモデルは、加速コア1のインダクタンスX_sと抵抗R_sの直列接続で表現したが、図12(c)に示すように並列接続で表現することもできる。並列接続で表現したインダクタンス成分X_p(=ωL_p)と、抵抗成分R_pをX_s、R_sを用いて表すと次の数式となる。この数式2は直列接続と並列接続のインピーダンスが等しいとおくことで求められる。

【0014】

【数2】

$$\omega L_p = X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = 2\pi \cdot \mu_p Q f \cdot L_0 \quad \left[\mu_p = \frac{\mu'^2 + \mu''^2}{\mu'} \right]$$

【0015】

ここで、R_pはシャントインピーダンスと呼ばれる量であり、後述する数式3でも明らかのように、RF加速空洞100のインダクタンスと加速電極ギャップ2のキャパシタンスCが並列共振し、インピーダンスが無限大になった時に得られるインピーダンスである。また通常一般に表現されているμ_pQfは加速コア材特有の量(シャント抵抗値、Q値)であり、これが大きいほど大きなインピーダンスが得られる。加速電極ギャップ2のキャパシタンスも含めたRF加速空洞のインピーダンスZ_cは、L_pとR_pを用いて以下となる。

【0016】

【数3】

$$|Z_c| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \left(\frac{1}{\omega L_p} - \omega C\right)^2}}$$

【0017】

ここで、|Z_c|はインピーダンスの絶対値である。

所定の加速電圧V(ピーク値)を得るために必要な電力Pは、以下で求められる。

【0018】

【数4】

$$P = \frac{V^2}{2|Zc|}$$

【0019】

消費電力を下げるためには、RF加速空洞100のインピーダンス|Zc|を大きくすればよい。|Zc|を大きくする一つの方法は、加速周波数範囲において、共振条件(1/Lp=C)を満たすようにインダクタンスを変化させることである(前述の同調型RF加速空洞、特許文献1)。

一方、数式3において、分母の第1項が第2項より十分大きければ、少々共振条件からずれても、|Zc|は低下しない。すなわち、RpをXp(=Lp)と比較して小さくすれば、特に共振を取らなくても実用上は問題がない(非同調型RF加速空洞、特許文献2、3)。この関係を加速コア1のQ値を用いて表現すると、次の5式となる。

【0020】

【数5】

$$Q = \frac{\mu'}{\mu''} = \frac{Xs}{Rs} = \frac{Rp}{Xp} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

【0021】

ここで、f0は共振周波数、fは半値幅(|Zc|^2がピークの半分以上を保つ周波数帯域)である。Q値の小さい材質を用いれば、非同調型RF加速空洞を実現することが判る。

【0022】

以上の議論をベースに、従来のRF加速空洞の課題に関し以下説明をする。

加速コア1の磁性体材としてMAコア(Magnetic Alloyコア)、例えば、アモルファス系の積層合金薄膜を用いている非同調型RF加速空洞は、1000Gsを越える磁束密度においてもシャントインピーダンス(損失抵抗)が劣化しない特徴があるが、シャントインピーダンスを数百以上にすることが難しい。

一方、フェライトを用いた同調型RF加速空洞は、後述するように非同調型RF加速空洞と比較して、シャントインピーダンスの向上が少ない上に、RF加速空洞に印加可能な加速電圧の最大値が小さいという課題がある。

この2つの課題について、同調型RF加速空洞(フェライトコア材、Q=20)と、非同調型RF加速空洞(MAコア材、Q=0.5)について具体例を挙げて説明する。

【0023】

共振周波数を3MHzとし、図12に示すRF加速空洞100の加速電極ギャップ2キャパシタンスは、50、100、200pFとする。この場合のMAコアとフェライトコアの空洞特性の概算結果を表1に示す。

【0024】

【表1】

表1. コア材による空洞特性

積層合金薄膜(MA)		Q = 0.5			フェライト			Q = 20		
		Δf = 6						Δf = 0.15		
C(pF)	50	100	200	C(pF)	50	100	200	100	200	200
Xp(Ω)	1061	531	265	Xp(Ω)	1061	531	265	10620	5300	2650
Rp(Ω)	531	265	133	Rp(Ω)	21220	10620	5300			

【0025】

まず、M A コア材を用いた非同調型 R F 加速空洞の特性を説明する。

M A コアは Q 値が小さいため半値幅が大きい (数式 5 より $f = 6 \text{ MHz}$)。この例では、加速周波数帯域 ($2 \sim 4 \text{ MHz}$ を想定する) が半値幅に含まれるため、計算例では加速の全周波数帯域にわたり、ピーク値の 80 % 程度のインピーダンスを伴っている。一方、共振周波数と加速電極ギャップ 2 のキャパシタンスが決まれば、 X_p 、 R_p ($= Q \cdot X_p$) は一意に決まる。加速電極ギャップ 2 のキャパシタンスを 50 p F 以下に抑制するのは困難なため、M A コア材を用いた R F 加速空洞 100 のインピーダンスを数百 以上にするのは難しいことがわかる。

【 0 0 2 6 】

次にフェライトコア材を用いた同調型 R F 加速空洞特性を述べる。フェライト材の Q 値にはかなり幅があるが、ここでは仮に、 $Q = 20$ の加速コア 1 を用いることを想定する。Q 値が大きいため半値幅は $1 / 40$ (0.15 MHz) しかないが、R F 加速空洞 100 のインピーダンスについては、M A コア材を用いた R F 加速空洞 100 に比較して 40 倍まで引き上げることが可能であり、大幅な電力削減を期待できる。

しかしながら、現実のフェライト材を用いた R F 加速空洞 100 では、Q 値を 1 程度のフェライトコア材を用いることが多く、R F 加速空洞 100 のインピーダンスもそれほど上げることが出来ない。その理由はフェライト材のインダクタンス制御が難しく、高 Q 値のコア (共振周波数以外ではほとんど機能しないコア) を使うと、安定した制御が出来なくなるためである。

【 0 0 2 7 】

以下、その事情を詳細に説明する。

従来と同調型 R F 加速空洞 100 では、加速コア 1 のインダクタンスを変化させるため、直流磁界を重畳してフェライトコアの透磁率を変化させる方式を採用していた。この方式を図 13 について説明する。

図 13 は、フェライトの B - H 曲線を示す (簡単のため、ヒステリシスは考慮していない)。透磁率 μ は、 $B = \mu H$ より求められる。B はコア中の磁束密度、H は起磁力であり、コアを鎖交する電流に比例する。これより、図 13 における初透磁率 (原点周辺の透磁率) は、 $\mu_1 = \tan(\theta_1)$ ということになる。H の大きいところではコアが飽和してくるため、B - H 曲線の傾きが小さくなる。この性質を用いれば、例えば動作点 q における透磁率 μ_q は、 $\mu_q = \tan(\theta_q)$ となり、透磁率を変化させることができる。この方式の R F 加速空洞 100 は前述したように、動作の不安定性と、印加可能な加速電圧が小さいことが課題であった。

【 0 0 2 8 】

まず、動作の不安定性について説明する。

フェライトは一般にキュリー温度が低く、温度によって B - H 特性が変化しやすい。特にこの方式は、B - H 特性の微分値 (透磁率) を制御することで共振させているため、不安定性が拡大されてしまう。さらに、R F 加速空洞 100 を駆動することにより加速コア 1 自体が発熱し、温度平衡に達するまで加速コア 1 の温度が変化していくという問題もあり、R F 加速空洞 100 の制御を難しくしている。

従来と同調型 R F 加速空洞 100 では、制御の難しさ故、加速周波数と R F 加速空洞 100 の共振周波数のマッチング誤差を大きくみる必要があった。これは、マッチングがずれてもインピーダンスが変化しにくいコア、すなわち Q 値の低い加速コア 1 を指向することを意味しており、従来と同調型 R F 加速空洞では、Q 値が ~ 1 程度のフェライトコア材を用いることが多かった。

この程度の Q 値では、表 1 に示された高インピーダンス R F 加速空洞は実現できず、現在では、熱的安定性、動作領域に優れた M A コア材を用いた非同調型の R F 加速空洞 100 が主流になりつつある。

【 0 0 2 9 】

次に、印加可能加速電圧が小さい理由について説明する。加速電極ギャップ 2 に発生する加速電圧 V は、加速コア 1 内の高周波電流による磁束密度の変化 dB / dt と、加速コ

ア 1 の断面積 S との積になる。すなわち、高周波電流による加速コア 1 中の磁束密度の変化が大きいほど、大きい加速電圧を得ることができる。

加速コア 1 の動作領域は、通常、加速コア 1 の飽和磁束密度 B_s の 70 ~ 90 % 程度であるから、大きい加速電圧を得るためには、加速コア 1 を図 1 3 の原点両振り動作させるのが望ましい。

しかしこの方式では、直流磁界を重畳して透磁率を変化させているため、加速コア 1 の動作領域は $B_s - B_q$ の範囲となり大幅に狭くなってしまふ。

それにも関わらず、一定の加速電圧を得ようとするため、加速コア 1 の断面積を増やす必要があり、結果として同調型 RF 加速空洞 1 0 0 は大型化している。

以上の説明で明らかになったように、従来と同調型 RF 加速空洞 1 0 0 は加速コア 1 に直流磁界を重畳してインダクタンスを変化させたため、種々の不都合を生じていた。

【 0 0 3 0 】

上記のような課題を解決するために本発明が為されたものであり、同調型 RF 加速空洞に係る各構成、動作を各実施の形態について説明する。

【 0 0 3 1 】

実施の形態 1 .

この発明の実施の形態 1 を図に基づいて説明する。図 1 (a) において、RF 加速空洞 1 0 0 は加速コア 1 と加速電極ギャップ 2 と空洞外壁 3 と真空ダクト 4 とで構成される加速空洞本体 5 0 と、高周波電源 5 と前記加速空洞本体 5 0 の外部にあって、前記加速電極ギャップ 2 に並列に設けられたコア材を有するインダクタンス可変手段 6 によって構成されている。なお、荷電粒子ビーム B は図 1 の左側より右側に進むものとする。

図 1 (b) は、RF 加速空洞 1 0 0 を並列電気回路でモデル化したものを示す。R p は加速コア 1 の抵抗成分でシャントインピーダンスを示し、L p はインダクタンス成分を示す。L v はインダクタンス可変手段 6 のインダクタンスを示し、C は加速電極ギャップ 2 のキャパシタンスを示す。

この実施の形態 1 における RF 加速空洞 1 0 0 は、加速コア 1 とは別個に同調用のインダクタンスをインダクタンス可変手段 6 として加速電極ギャップ 2 に並列に設け、前記インダクタンス可変手段 6 のインダクタンス量を変化させることで同調運転を可能とするものである。

【 0 0 3 2 】

次にインダクタンス可変手段 6 の動作を説明する。最初に前記加速コア 1 と、インダクタンス可変手段 6 を構成する図示省略のコアの役割について簡単に説明する。

加速空洞本体 5 0 内に装荷された加速コア 1 は、加速電極ギャップ 2 に誘導電界を発生させるための交流磁束の媒体であり、荷電粒子ビーム B と鎖交しなければならない。すなわち、荷電粒子ビーム B を鎖交するコアに発生した磁束がビーム B を加速する電界を生成する。この際、インダクタンス可変手段 6 を用いて加速空洞本体 5 0 のインダクタンスを変化させれば、コアの透磁率を変化させる必要がないため、動作領域を 0 から飽和磁束密度までフルに利用できる。すなわち、比較的飽和磁束の小さいコア材料でも、十分大きな動作領域を確保することができるため、コア材料に対する制限が大幅に緩和される。

一方、インダクタンス可変手段 6 は、加速電極ギャップ 2 のキャパシタンス C との LC 共振周波数を調整するために存在し、ビーム B の加速には寄与しない。このため、Q 値の高いコア材を用いて、加速空洞本体 5 0 のインピーダンスの低下を抑制するのが望ましい。また、ビーム B と鎖交するという条件がないため、インダクタンスを変化させる様々な手法が可能となる。さらに、形状や図示省略したコイルの巻き数を自由に選べるため、インダクタンス可変手段 6 に用いるコア材質に対する制限が大幅に緩和される。

以上のように、加速空洞本体 5 0 の加速電極ギャップ 2 に並列にインダクタンス可変手段 6 を設けることにより、加速空洞本体 5 0 のインピーダンスを高く出来るとともに、加速コア 1 のコア材およびインダクタンス可変手段 6 のコア材に要求される条件が大幅に緩和される。

【 0 0 3 3 】

以上、インダクタンス可変手段 6 を並列に負荷した R F 加速空洞 100 の特性向上について述べたが、次にインダクタンス可変手段 6 の実施例を図 2 に基づいて説明する。通常一般に、インダクタンスを可変するための手法としては、大きく分けて磁気抵抗を変化させる方法と、コア透磁率を変化させる方法とがあり、前者は例えばギャップ付コアのギャップを変化させる方法であり、後者は従来例でも示したバイアス磁場を変化させる方法に相当する。この実施例では、磁気抵抗を変化させる構成を採用している。

【0034】

図 2 は前記図 1 に示したインダクタンス可変手段 6 の詳細図である。インダクタンス可変手段 6 はトロイダルコア 7 と平板状トロイダル磁性体 8 と、この平板状トロイダル磁性体 8 を制御、回転駆動する回転駆動機構 9 によって構成される。トロイダルコア 7 は図示省略のコイルを有すると共に例えば、フェライト等の磁性体が用いられ、外半径 r_2 、内半径 r_1 を有するとともに、図 2 に示すように周方向に 1 個所ギャップ長 a のギャップ 7a が設けられている。平板状トロイダル磁性体 8 は外半径 r_4 、内半径 r_3 を有するドーナツ状をなし、例えばフェライト等の渦電流損の少ない μ_p 、 Qf 値の高いトロイダル磁性材 8a と、セラミック系のトロイダル非磁性材 8b とは、板厚方向において所定の角度傾斜したテーパ面 8c が形成されているとともに、互いにテーパ面 8c で接着して構成されている。トロイダル磁性材 8a は厚肉部で t_{a1} 、薄肉部で t_{a2} 、トロイダル非磁性材 8b のそれは t_{b1} 、 t_{b2} を有し、接着後の厚さ t は、 $t = t_{a1} + t_{b2}$ あるいは $t = t_{a2} + t_{b1}$ である。

前記平板状トロイダル磁性体 8 の厚さ t は前記トロイダルコア 7 のギャップ 7a のギャップ長 a より小さい。またトロイダル磁性材 8 の y 軸はトロイダルコア 7 の Y 軸に並行に設けられ、例えばモータによる駆動機構 9 によって図示のように回転する。なお、トロイダルコア 7 の幅 $W_7 = r_2 - r_1$ と、トロイダル磁性体 8 の幅 $W_8 = r_4 - r_3$ との関係は $W_7 = W_8$ 、 $W_7 > W_8$ または $W_8 > W_7$ のいずれかが選択される。なお、テーパ形状を有することによるテーパ先端部の過熱は平板状トロイダル磁性体が回転することによる空冷効果により低減させることができる。

【0035】

次に磁気抵抗を変化させる方法について説明する。まず、基本となるトロイダルコア 7 のインダクタンスを求める。内径 r_1 、外径 r_2 のトロイダルコア 7 の平均磁路長 m と、磁気抵抗 R_m 、及び N 回巻きコイルのコアのインダクタンス L は、次の数式 6 で表される。ここで、磁路長は、コア中の磁束の平均的な長さ、 μ_r は比透磁率、 μ_0 は真空の透磁率である。

【0036】

【数 6】

$$m = \pi (r_1 + r_2)$$

$$R_m = m / (\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S)$$

$$L = N^2 / R_m$$

【0037】

次に、このコアの一部を切り欠き、ギャップ長 a を設けた場合のインダクタンスを求める。ギャップを含む磁気抵抗 R_{mg} は、次の数式 7 のように変化する。

【0038】

【数 7】

$$R_{mg} = \frac{a}{\mu_0 S} + \frac{m-a}{\mu_r \mu_0 S} = \frac{a}{\mu_0 S} \left(\frac{m}{a} - 1 + \mu_r \right)$$

$$R_{mg} \approx \frac{a}{\mu_0 S} \quad \left(\frac{m}{a} \ll \mu_r \right)$$

$$R_{mg} \approx \frac{m}{\mu_r \mu_0 S} \quad \left(\frac{m}{a} \gg \mu_r \right)$$

【0039】

図2に示すようにトロイダル磁性体8をトロイダルコア7のギャップ7a間で図示省略の制御手段を介し、回転駆動機構9によって回転させると、トロイダルコア7とトロイダル磁性材8a間のギャップが連続的に変化して、磁気抵抗が変化し、可変インダクタンスとなる。その際、円形加速器、例えばイオンシンクロトロン内に設置されたRF加速空洞100を荷電粒子ビーム加速周波数の変化パターンに合わせて、インダクタンスが同様の变化となるように、トロイダル磁性体8を回転駆動するモータを制御、回転しトロイダル磁性材8aの形状をトロイダルコア7に対して変化させることにより、加速周波数の変化パターンに合わせた同調が可能となる。なおトロイダル非磁性材8bは回転のバランスとしての構成要素をなし、同程度の重さを有するものでも良いが、より厳密なバランス調整を行う場合は、トロイダル磁性材8aより若干重く作り、穿孔により回転バランスを合わせてもよい。

なお、この実施の形態1では加速電極ギャップ2のキャパシタンスCと並列に可変手段インダクタンス6を入れた例を示したが、図3(a)に示すように、可変インダクタンス成分をもつインピーダンス6aでも同様の効果を奏する。また、図1(a)に示した加速電極ギャップ2間に電極板を設けることによって図3(b)に示すように、キャパシタンスCを2分割したC₁とC₂とし、その一部に可変インダクタンスLvまたはインピーダンスZを入れてもよい。

【0040】

また、平板状トロイダル磁性体は磁性材と非磁性材とをテーパ面で一体化した構成を示したが、テーパに限らず例えば階段形状であってもよい。またさらに、加速電極ギャップ2は1段設ける例を示したが、2段以上の多段であってもよい。

【0041】

実施の形態2.

この実施の形態2では、実施の形態1で示した実施例と同様、磁気抵抗を変化させてインダクタンスを変化させる方法を、図4について説明する。この構成では、ドーナツ状のコアを半分割し、その一方を固定側とし、他の片側を回転させて磁極ギャップを変化させたインダクタンス可変手段6aを実現している。

図4においてインダクタンス可変手段6aは、磁性材を用いたドーナツ状コアを半分割した半円状トロイダル固定コア10(コイルは図示省略)と、このトロイダル固定コア10と同軸上(X-X軸上)で回転可能なドーナツ状コアを半分割した半円状トロイダル回転コア11と、この半円状トロイダル回転コア11を回転駆動する回転駆動機構9とより構成されている。なお、半円状トロイダル固定コア10の端部10Eと、半円状トロイダル回転コア11の端部11E間には、ギャップ長aの磁極ギャップが設けてある。

このような構成のインダクタンス可変手段6aは半円状トロイダル固定コア10と半円状トロイダル回転コア11との間の磁極ギャップaの変化を大きくできるため、比較的μ_rの低い、例えばフェライト材でも数式7の(m/a << μ_r)の条件を満たすことができる。

この形状で加速周波数変化パターン（インダクタンス変化パターン）を所望の形状にするためには、半円状トロイダル固定コア 10 の端面 10 F に適当な磁極シムを取り付けられればよい。

尚、この図 4 では、回転軸は横向きになっているが、垂直（磁極吊り下げがベター）にした方が、軸に重力による曲げ応力が生じず、滑らかな運転が可能となる。

また、この形状を有するインダクタンス可変手段 6 a においても、回転時の回転バランス、及び、空気抵抗を改善するため、図 5 に示すように外形が回転対称になるようなセラミック等の非磁性半球状回転バランス 12 をトロイダル回転側コア 11 に設けたインダクタンス可変手段 6 b とすると滑らかな回転を得ることが出来る。

【0042】

実施の形態 3 .

次に実施の形態 3 について述べる。円形加速器、例えばイオンシンクロトロン等の荷電粒子加速周波数の繰り返し周波数が 100 Hz を越えるような場合には、前記実施の形態 1、2 に示したコアの回転による磁極ギャップの変化を得る構成は、回転駆動機構 9 の回転数上限の関係から実現が難しくなる。この課題を解決するため、実施の形態 1 の図 2 の平板状トロイダル磁性体 8 に代替して、1 回の回転で複数の磁気抵抗変化が発生するような平板状トロイダル磁性体を設けたインダクタンス可変手段とすればよい。図 6 にこの実施の形態 3 によるインダクタンス可変手段 6 c を示す。図 6 において、トロイダルコア 7 は前記図 2 と同様である。平板状トロイダル磁性体 8 は、図 1 に示した平板状トロイダル磁性体 8 と同一の大きさの外半径 r_4 、内半径 r_3 、厚さ t を有したドーナツ状をなしている。この平板状トロイダル磁性体 8 はフェライト等の磁性体 8 a とセラミック系の非磁性材 8 b とで構成されており、磁性材 8 a と非磁性材 8 b とがドーナツ状円周方向で交互に複数の鋸歯形状 8 d を周方向に順次周期的に組み合わせ形成して接着されている。図 6 に示す例の平板状トロイダル磁性体 8 は 4 個の鋸歯形状 8 d を備えているが、この数に限るものではない。

このような構成のインダクタンス可変手段 6 c において、回転駆動機構 9 によって平板状トロイダル磁性体 8 を回転させると、円形加速器の加速周波数の変化パターンと同じ磁気抵抗の変化パターン（インダクタンス変化パターン）、つまり加速周波数変化パターンに合わせた RF 加速空洞 50 と同調が可能となる。

【0043】

実施の形態 4 .

実施の形態 4 を図 7 に基づいて説明する。この実施の形態 4 は、前記した実施の形態 2 の図 4 に示したインダクタンス可変手段 6 a のトロイダル回転コア 11 に代替して、多極化したトロイダル回転コアを設けたものである。

図 7 において、多極トロイダル回転コア 11 はドーナツ状コアを半分分割したトロイダル回転コア 11 a、11 b とが十文字状に接着されている。このような多極トロイダル回転コア 11 を回転駆動機構 9 によって回転させることにより、加速周波数の変化パターンに合わせたインダクタンス変化パターンがより容易に得られる。なお、このインダクタンス変化パターンの微調整は、固定コア 10 の端部 10 F の磁極形状を変更する。例えば適当な磁極シムを取り付けられればよい。

【0044】

実施の形態 5 .

次に実施の形態 5 について述べる。この実施の形態 5 によるインダクタンス可変手段 6 は、図 8 (a) (b) に示すように固定インダクタンス 13 を加速電極ギャップ 2 に並列にかつ加速空洞本体 50 の外部に外付けコアとして設けた構成である。なお、この構成が有利になる条件は以下の通りである。

1 . 高い加速電圧を必要とするため、励磁磁束を大きくしたい。しかも、加速コアの設置スペースに制限があり、磁束密度を上げるため、高い飽和磁束密度を持つ加速コアが必要。

2 . 加速周波数帯域が狭く、RF 加速空洞の $Q = 3 \sim 9$ 程度まで許容。

従来は特許文献3に示したように、同様の条件のRF加速空洞を実現するため、加速コアにギャップを設け、ギャップ幅を調整することで加速コアのインダクタンスを下げ、ある共振周波数におけるシャントインピーダンスを大きくすると共に、Q値の調整を行っていた。

この実施の形態5では前述した特許文献3の課題を解決するものであり、図8に示すように、加速電極ギャップ2に並列に固定インダクタンス13を接続することで、加速コアにギャップを設けるのと同等の効果を得ることができる。このように固定インダクタンス13を用いる場合は、加速コアにギャップを設ける必要がなく、かつ、インダクタンスを可変にする必要がないので、安価にRF加速空洞100を製作することができる。

【0045】

以下、この実施の形態5による本構成の動作を試算例を基に説明する。

加速コア1のインピーダンスを $Z_1 = R_1 + iX_1$ 、外付けコア13のインピーダンスを $Z_2 = R_2 + iX_2$ とする。このとき、2つのコアの並列インピーダンス $Z_3 = R_3 + iX_3$ の各成分は下記数式8となる。

【0046】

【数8】

$$R_3 = \frac{R_1(R_2^2 + X_2^2) + R_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \frac{R_1|Z_2|^2 + R_2|Z_1|^2}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

$$X_3 = \frac{X_1(R_2^2 + X_2^2) + X_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \frac{X_1|Z_2|^2 + X_2|Z_1|^2}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

【0047】

これより、 $Q = X_3 / R_3$ は、次式となる。

【0048】

【数9】

$$Q = \frac{X_3}{R_3} = \frac{X_1|Z_2|^2 + X_2|Z_1|^2}{R_1|Z_2|^2 + R_2|Z_1|^2}$$

【0049】

ここで、代表的な例について、並列に設けた固定インダクタンス(外付け)13の効果を試算してみる。まず、 Z_1 として、MAコア材料を想定し $Q_1 = 0.5$ 、 Z_2 として、フェライトを想定し、 $Q_2 = 20$ とする。さらに、外付けコア13のインピーダンスのインダクタンス成分を加速コア1の半分とすれば、下式が得られる。

【0050】

【数 1 0】

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 2 \cdot X_1 \\
 R_2 &= 0.05 \cdot X_2 \\
 X_2 &= 0.5 \cdot X_1 \\
 R_3 &= 0.099 \cdot X_1 \\
 X_3 &= 0.43 \cdot X_1 \\
 Q &= 4.4
 \end{aligned}$$

【0051】

並列に設けた固定インダクタンス13の付加効果をみるためには、並列接続形式に変換した方が便利であるため、MAコア材料単体 (Z_1)、及び固定インダクタンス付加時 (Z_3) のインピーダンスを、数式2を用いて変換し、数式10を代入すると、以下が得られる。

【0052】

【数 1 1】

$$\begin{aligned}
 Z_{p1} &= R_{p1} + iX_{p1} \\
 Z_{p3} &= R_{p3} + iX_{p3} \\
 X_{p1} &= 5 \cdot X_1 \\
 X_{p3} &= 0.46 \cdot X_1 \\
 X_{p3} &= 0.091 \cdot X_{p1} \\
 R_{p1} &= 2.5 \cdot X_1 \\
 R_{p3} &= 2 \cdot X_1 \\
 R_{p3} &= 0.8 \cdot R_{p1}
 \end{aligned}$$

【0053】

一方、RF加速空洞100のインダクタンスは、共振周波数と加速電極ギャップ2のキャパシタンスCにより、一意に定まるため、インダクタンスが同じになるように調整する必要がある。この例では、RF加速空洞100のインダクタンスが0.091倍になっているから、外付けインダクタンス13のコア厚を1/0.091倍にする等の方法で、同じインダクタンスになるように調整する。この調整により、シャントインピーダンスも1/0.091倍される。

結局、RF加速空洞100のインピーダンス Z'_{p3} は次式となる。

【0054】

【数 1 2】

$$\begin{aligned}
 Z'_{p3} &= R'_{p3} + iX'_{p3} \\
 X'_{p3} &= X_{p1} \\
 R'_{p3} &= 8.8 \cdot R_{p1}
 \end{aligned}$$

【0055】

すなわち、この実施の形態5では、加速電極ギャップ2に適正に選定された寸法を有する並列に固定インダクタンス13を付加することにより、シャントインピーダンスが8.8倍となり、Q値が0.54.4と大きくなることがわかる。

これは例えば前記特許文献3に示されるコアにギャップを設ける効果と同等であり、コアを切断する必要がない分だけ、安価に空洞を構成できる。

【 0 0 5 6 】

実施の形態 6 .

次に実施の形態 6 のインダクタンス可変手段 6 e を図 9 に基づいて説明する。

以上の実施の形態では、構造的、機構的にインダクタンスを変化させる場合であったが、この実施の形態 6 では、回路的にインダクタンスを変化させるものである。

図 9 に示すように、加速電極ギャップ 2 に並列に、例えばトロイダル状の空胴コア 1 7 が加速空胴本体 5 0 の外部に設けられているとともに、この空胴コア 1 7 に可変定電流電源 1 6 が設けられている。この可変定電流電源 1 6 を荷電粒子ビームを加速するための加速周波数の変化パターンに合わせて ON することによって空胴コア 1 7 インダクタンスを変化させるものである。

実施の形態 1 で説明したように、フェライトの特性は熱的に不安定なため、バイアス電流によるインダクタンス調整が難しい。しかし、この実施の形態 6 の図 9 に示す外付けインダクタンスに相当する空胴コアは設置場所に制約されることなく、また空胴外壁 3 を取り巻く必要がなく、サイズも自由に選べるため、冷却システムを容易に構成することができる。例えば、空胴コアのコア自体を冷媒に浸して液冷する構成も、簡単に実現することができる。熱的な安定性を向上させることができる。

さらに、加速コア 1 として Q 値の低いコア ($Q = 0.5$) を用いる場合、数式 1 0 に示されるように、 $Q = 20$ というロスの小さいフェライトを選んでも、RF 加速空胴 1 0 0 全体としては $Q = 4.4$ 程度となり、共振の鋭さが小さくなる。別の言い方をすれば、パワーロスの小さい (Q 値の大きい) フェライトを使用し、フェライトの発熱を抑制して温度変動を抑制すると共に、共振の鋭さを小さくして共振の安定性を向上させることによりこの実施の形態 6 における本方式の共振の不安定性を大幅に抑制することが可能となる。

なお、前記加速コア 1 材の Q 値 ($\mu_p Q_f$) と、インダクタンス可変手段の磁性材の Q 値が異なり、かつ前記加速コア材の Q 値が前記インダクタンス可変手段の磁性材の Q 値より小さいように選定するのは前記実施の形態 1 ~ 5 および後述の実施の形態 7 に適用された場合にその効果を一層向上させるためである。

【 0 0 5 7 】

実施の形態 7 .

実施の形態 7 を図 1 0 に基づいて説明する。この実施の形態 7 のインダクタンス可変手段 6 f はインダクタンスを段階的に変化させて概同調させるものである。 Q 値が ~ 5 程度の RF 加速空胴なら、共振周波数 f (数 MHz を想定) に対し、 $f \pm 0.25$ MHz 程度まで、共振時の 90% のインピーダンスを維持する。一方、通常の加速器における加速周波数の変化幅は、 $1 \sim 5$ MHz 程度である。これより、5 MHz の加速周波数変化幅がある場合には、インダクタンスを 10 回離散的に変化させれば連続的に同調させた場合の 90% のインピーダンスを維持することになる。

次に、インダクタンスを段階的に変化させる構成を図 1 0 について説明する。図 1 0 に示すように加速電極ギャップ 2 に並列に接続された、例えば 3 個の外付けインダクタンスに相当する空胴コア 1 7 a、1 7 b、1 7 c とそのそれぞれに接続された可変定電流電源 1 6 a ~ 1 6 c およびスイッチ 2 0 a ~ 2 0 c が設けられている。スイッチ 2 0 a ~ 2 0 c の加速周波数の変化パターンに合わせて ON されることにより空胴コアにバイアス電流が流れるように構成されている。但し、バイアス電流は ON、OFF の 2 つのモードしかなく、ON の場合には、外付けインダクタンス 1 7 a ~ 1 7 c のコアが飽和し、透磁率が 1 に近い値になる。

このような構成を採用することで、空胴コアである外付けインダクタンス 1 7 a ~ 1 7 c の数が 1、2、3 と変化し、インダクタンスを 3 倍変化させることが出来る。なお、空胴コアの数を 3 個としたが、これに限るものではない。

【 0 0 5 8 】

なお、外付けインダクタンス 1 7 a ~ 1 7 c は、図 1 1 に示すように単に加速電極ギャップ 2 に並列に接続され、回路上の隣接する空胴コア間、図 1 1 では 1 7 a と 1 7 b、1 7 b と 1 7 c 間にスイッチ 2 0 a、2 0 b を設け図示省略の制御手段の信号により前記ス

スイッチをONさせる構成であってもよい。

【0059】

実施の形態8.

以上では、空胴のギャップに並列に設けたインダクタンスを、可変インダクタンスとして説明してきたが、固定インダクタンスを用いれば、空胴を、加速周波数帯域を狭く、高インピーダンスをもつ特性に変化させることができる。これは、特許文献3と同じ目的で、並列固定インダクタンスを調整することで、RF加速空胴のQ値を任意に調整できることを意味しており、同様のアプリケーションでは、コアの切断やギャップ調整機構を用いることなく、安価にQ値の調整が可能である。

【0060】

実施の形態9.

以上述べた実施の形態1~8の構成を備えたRF加速空胴100は、荷電粒子ビーム加速あるいは蓄積する円形加速器に適用すると、簡単な制御によって加速周波数とRF加速空胴との共振周波数の同調が容易に行うことができる。その結果、加速電圧の上昇、加速の安定性、加速エネルギーやビーム電流値の上昇、さらには円形加速装置のコンパクト化等優れた効果を奏する。

【産業上の利用可能性】

【0061】

この発明の活用例として、荷電粒子を加速あるいは蓄積する円形加速器の高周波加速空胴に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0062】

【図1】この発明の実施の形態1によるRF加速空胴の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図2】この発明の実施の形態1によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図3】この発明の実施の形態1によるインダクタンス可変手段の配置を示す図である。

【図4】この発明の実施の形態2によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図5】この発明の実施の形態2によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図6】この発明の実施の形態3によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図7】この発明の実施の形態4によるインダクタンス可変手段の構成を示す図である。

【図8】この発明の実施の形態5によるRF加速空胴の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図9】この発明の実施の形態6によるRF加速空胴の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図10】この発明の実施の形態7によるRF加速空胴の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図11】この発明の実施の形態7によるRF加速空胴の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図12】従来のRF加速空胴の構成を示す模式図とその等価回路を示す図である。

【図13】フェライトのB-H曲線を示す概略図である。

【符号の説明】

【0063】

1 加速コア、2 加速電極ギャップ、6, 6a~6f インダクタンス可変手段、
7 トロイダルコア、8 平板状トロイダル磁性体、8a トロイダル磁性材、
8b トロイダル非磁性材、9 回転駆動機構、10 半円状トロイダル固定コア、
11 半円状トロイダル回転コア、12 半球状バランサ、
13 外付けコア(固定インダクタンス)、16a~16c 可変定電流電源、
17a~17c 空胴コア、20a~20c スイッチ、50 加速空胴本体、
100 RF加速空胴。

フロントページの続き

(72)発明者 頭本 信行

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(72)発明者 石 禎浩

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

Fターム(参考) 2G085 AA13 BA04 BA05 BA06 BA09 BB15 BB17