

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-307300

(43) 公開日 平成11年(1999)11月5日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

H 0 5 H 13/04  
// H 0 5 H 7/18

H 0 5 H 13/04  
7/18

D

審査請求 有 請求項の数 3 O L (全 6 頁)

(21) 出願番号 特願平10-110578

(22) 出願日 平成10年(1998)4月21日

特許法第30条第1項適用申請有り 平成9年10月21日～10月23日 加速器同好会開催の「The 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Harima Science Garden City, 1997」において文書をもって発表

(71) 出願人 391012707

高エネルギー加速器研究機構長  
茨城県つくば市大穂1番地1

(72) 発明者 森 義治

東京都田無市緑町3-3-15

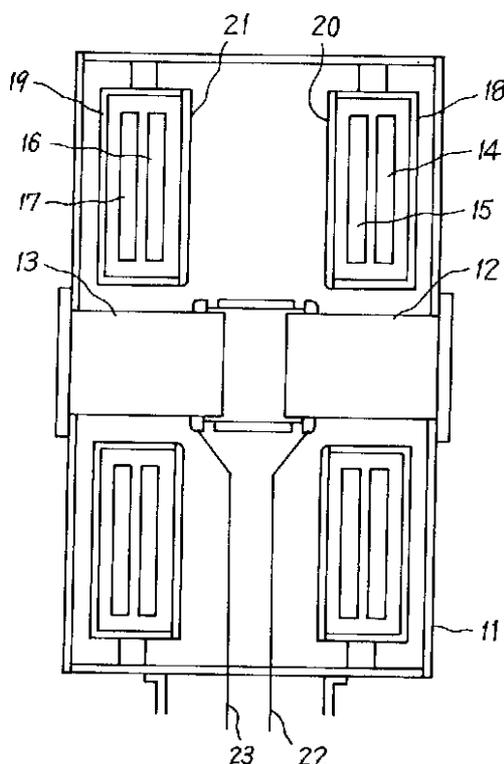
(74) 代理人 弁理士 杉村 暁秀 (外8名)

(54) 【発明の名称】 高加速勾配高周波空洞

(57) 【要約】

【課題】 50～100KV/m以上の実効電界勾配を達成することができる高周波加速空洞を提供する

【解決手段】 空洞内に高透磁率金属磁性体を配置し、この磁性体を循環する冷却媒体によって直接もしくは間接的に冷却するように構成した。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 高加速勾配高周波空胴において、この空胴内に装荷する高透磁率磁性体を高透磁率金属磁性体としたことを特徴とする高加速勾配高周波空胴。

【請求項2】 請求項1に記載の高加速勾配高周波空胴において、前記高透磁率金属磁性体の比透磁率を10以上としたことを特徴とする高加速勾配高周波空胴。

【請求項3】 請求項1または2に記載の高加速勾配高周波空胴において、前記高透磁率金属磁性体を循環する冷却媒体によって直接冷却するように構成したことを特徴とする高加速勾配高周波空胴。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、加速器分野における高周波加速装置に関するものであり、特に、陽子、重イオン等を高エネルギーまで加速させる円形加速器（シンクロトロン、サイクロトロン等）に用いられ、加速に必要な高周波電界を発生させる高加速勾配高周波空胴に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来のこのような高加速勾配高周波空胴においては、例えばトロイダル形状のフェライトのような高透磁率磁性体を空胴内に装荷し、空胴の透磁率を上げることによって、空胴全体の長さを短くするようにし\*

$$\bar{\rho} = \frac{W_t}{V} = \frac{V_{\sigma}^2}{4\pi\mu\mu_0 Q f} \frac{1}{\frac{(r_o^2 - r_i^2)}{2} \times l^2 \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (3)$$

によって与えられる。ここで、QをQ値とし、fを高周波周波数とする。前記実効高周波電界勾配は、以下の式によって示されるように、この電力密度に関係する。

【数4】

$$\left(\frac{V_{\sigma}}{l}\right)^2 = A \cdot \mu Q f \cdot \bar{\rho} \quad (4)$$

ここで、

【数5】

$$A = 2\pi\mu_0 (r_o^2 - r_i^2) \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (5)$$

とする。

【0004】電力密度は、 $\mu Q f$ 積が一定である場合、 $(V_{\sigma} / l)^2$  に比例する。フェライトの場合において、 $\mu Q f$ 積は一定でなく、高周波磁界強度 $B_{rf}$ が増加すると減少する。図1において、陽子シンクロトロンにおいて広く使用されているNi-Zn形式のフェライトに関する、代表的な $\mu Q f$ 積の $B_{rf}$ における依存性を白い丸で示す。式(3)に従ってこの形式のフェライトに関して計算した電力密度を、図2において点線で示す。

\* ている。また、陽子、重イオン等の重い粒子用の加速器に使用する場合、この磁性体に磁界を加えて共振周波数を変化させ、粒子速度に同調させるようにしている。

【0003】このような高加速勾配高周波空胴の加速効率、実効電界勾配 (= 空胴の単位長さあたりの加速電圧) として規定される。前記磁性体において消費される高周波電力は、

【数1】

$$W_t = \frac{\omega U}{Q} \quad (1)$$

によって与えられる。ここで、Uを前記高周波空胴に蓄積される高周波エネルギーとし、 $\nu$ を高周波角振動数とする。この蓄積されるエネルギーUは、

【数2】

$$U = \frac{\mu\mu_0}{2} \int V H_{\sigma}^2 dv = \frac{1}{2\mu\mu_0} \int B_{\sigma}^2 dv \quad (2)$$

によって与えられる。ここで、 $\mu$ を前記磁性体の比透磁率とし、 $\mu_0$ を真空の透磁率とし、 $B_{rf}$ を前記磁性体における高周波磁界強度とする。したがって、トロイダル形状とした前記磁性体の平均電力密度は、

【数3】

【0005】この図から明らかなように、実効電界勾配が20kV/m以上の場合、電力密度は極めて上昇する。すなわち、フェライトを使用した場合の実効電界勾配は、20kV/m以下に制限される。実際の高周波空胴の製造におけるスタッキングファクタは0.7程度であるため、フェライトを使用した場合の実効電界勾配は、最高14~15kV/mになる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】このように、従来のフェライトを装荷した高周波加速空胴においては、実効電界勾配が低いため、加速性能を高めようとするフェライトの数を多くする必要があり、高周波空胴全体の長さが長くなる。このようにすると、ビームから見た空胴のインピーダンスが上昇し、粒子ビームが誘起する電圧が高くなるので、加速ビーム強度を高めることが困難であるという問題があった。

【0007】本発明は、上述した従来のフェライトを装荷した高周波加速空胴における問題を解消するものであり、50~100KV/m以上の実効電界勾配を達成することができるように適切に構成した高周波加速空胴を提供することを目的とするものである。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明による高加速勾配高周波空洞は、この空洞内に装荷する高透磁率磁性体を高透磁率金属磁性体としたことを特徴とする。

【0009】本発明による高加速勾配高周波空洞の一実施形態は、前記高透磁率金属磁性体の比透磁率を10以上としたことを特徴とする。

【0010】本発明による高加速勾配高周波空洞においては、空洞内に装荷する高透磁率磁性体を、例えば、METGLAS（商品名）やFINEMET（商品名）のような、高透磁率のアモルファスならびに結晶性の金属磁性体とする。高周波空洞の透磁率を上げることにに関して、従来のフェライトと同様の効果を得るためには、比透磁率が10以上の金属磁性体を使用することが望ましい。このような金属磁性体は、飽和磁界強度がフェライトよりもほぼ一桁高く、ヒステリシス損が無視しうる程小さいため、 $\mu Q f$ 積は前記フェライトの場合のように変化しない。例として、異なった $B_{rf}$ に対するFINEMETの代表的な $\mu Q f$ 積を、図1において白い三角形と白い正方形とで示す。 $\mu Q f$ 積は、1kG以上の大きい $B_{rf}$ においてもほぼ一定であることがわかる。

【0011】例としてFINEMETに関して前記実効電界勾配の関数として計算した電力密度を、図2において実線で示す。この電力密度は、 $(V_{rf}/l)^2$ に比例する。この図から明らかなように、本発明による高加速勾配高周波空洞において電力密度を高くすれば、従来のフェライトを装荷する高周波空洞をはるかに上回る実効電界勾配を達成することができる。

【0012】高周波空洞内の高透磁率磁性体は高周波電界を吸収して温度が上昇するため、冷却する必要がある。従来のフェライトの場合、気体を吹きつけるか、例えば銅でくるんで液体冷却媒体によって冷却していた。フェライトを水や油等の液体冷却媒体で直接冷却しようとすると、媒体が浸透し、特性が変化する恐れがあるため、問題があった。また、フェライトの場合、電力密度を高くしてもそれほど電界勾配を高めることができないため、上述したような冷却方法で十分であった。

【0013】上述したように、本発明による高加速勾配高周波空洞においては、電力密度をより高くすることによって実効電界勾配をより高めることができるため、従来のフェライトの冷却方法では十分でなくなる恐れがある。

【0014】したがって、本発明の他の実施形態による高加速勾配高周波空洞は、前記高透磁率金属磁性体を循環する冷却媒体によって直接冷却するように構成したことを特徴とする。

【0015】前記冷却媒体としては、絶縁油や、フッ化物のようないくつかの有機媒質や、SF<sub>6</sub>のようないくつかのガスや、精製水のような種々の液体または気体を使用することができる。高周波空洞における環境状態から見て、精製水が最も良いものの1つであると思われ

る。水を使用することの問題は、大きな誘電率（20°Cにおいて $\epsilon = 80.36$ ）を有することである。水によって寄与されるキャパシタンスを、高周波空洞の合計のキャパシタンスに含めなければならない。幸いにも、本発明による高加速勾配高周波空洞のQ値は通常低い（1~10）ので、このキャパシタンスの制御は、それほど難しくない。

【0016】前記電界勾配が $V_{rf}/l = 100 \text{ kV/m}$ のように高い場合でも、FINEMETの電力密度は依然として $2.5 \text{ W/cm}^3$ 以下である。前記磁性体のスタッキングファクタを0.7とすると、前記実効電界勾配は $70 \text{ kV/m}$ となる。前記冷却媒体として、油や水等の適切なものを使用すれば、冷却性能は十分である。また、必要な実行電界勾配に応じて、使用する冷却システムや冷却媒体について考慮すれば、間接的に冷却することも可能である。

【0017】したがって、本発明による高加速勾配高周波空洞によって達成される電界勾配は、従来のフェライト装荷型高周波空洞による電界勾配の5倍以上高くなる。これは、同じ高周波電圧を発生するために必要な高透磁率磁性体の合計数が5分の1になり、空洞の全長が5分の1以下になることを意味する。このようにすれば、粒子ビームから見た該高周波空洞のインピーダンスは低下し、粒子ビームが誘起する電圧も低くなるので、加速ビーム強度を高めることが容易になる。これは、高強度高速循環シンクロトロンにおいて大きな利点である。もちろん、電力密度を高めれば必要な高周波電力は増加する。しかしながら、高強度シンクロトロンにおいては、ビーム電力も莫大である。また、高周波空洞における電力消費は、リングマグネットによって必要とされるよりも大幅に少ない。したがって、合計の高周波電力の正味の増加は、それほど大きくなる。合計の高周波空洞の費用は、もちろん大幅に減少する。

【0018】

【発明の実施の形態】図3は、本発明による高加速勾配高周波空洞を適用できるシンクロトロンの構成を例として示す線図である。このシンクロトロンにおいて、入射器1によって軌道に入射された荷電粒子ビーム2は、軌道部分にリング上に配置された電磁石3の作用を受けて軌道に沿って進み、本発明による高加速勾配高周波加速空洞4を通過するたびに位相安定性の原理によって加速される。

【0019】図4は、本発明による高加速勾配高周波空洞の一実施形態の断面図である。本高加速勾配高周波空洞11は、該空洞内に、該空洞外に通じるビームパイプ12および13と、これらのビームパイプ間の加速間隙を取り囲む高周波絶縁円筒と、ビームパイプ12および13を取り囲むように配置されたトロイダル形状の高透磁率金属磁性体14、15、16および17と、これらの磁性体14、15、16および17を各々収容するス

ステンレスシール箱18、19および高周波絶縁シール板20、21とを具える。

【0020】高透磁率金属磁性体14、15、16および17を、例えばアモルファス等の、10以上の比透磁率を有する金属とする。例えば、METGLASや、FINEMET等を使用することができる。例えば10 $\mu$ m程度の厚さのテープ状のこれらの材料を巻回してトロイダル形状を形成してもよい。

【0021】前記ステンレスシール箱および高周波絶縁シール板によって形成される容器中には、好適には精製水である冷却媒体を満たし、これを循環させて前記金属磁性体を冷却する。

【0022】ビームパイプ12および13に高周波直結フィーダ22および23を接続し、高周波電力を与えて、高加速勾配高周波空洞11内に高周波加速電界を発生させる。ビームパイプ12の側から入射したビームは、前記加速間隙において、前記高周波加速電界によって加速される。

【0023】本高加速勾配高周波空洞を陽子、重イオン等の重い粒子用の加速器に使用する場合、前記加速電界の共振周波数を粒子速度に同調させる必要がある場合には、高透磁率金属磁性体14、15、16および17をコアとしてコイル(図示せず)を形成し、これらの磁性体に磁界を加え、これらの透磁率を、すなわち本高周波空洞のインダクタンスを変化させる。

【0024】図5は、本発明による高加速勾配高周波空洞の他の実施形態の断面図である。この実施形態は前記実施形態に類似しているが、空洞に高周波を結合するために、磁性体の周囲からループ状結合環24を使用する点が異なっている。

【0025】上述したように、冷却媒体として水を使用した場合、水によって寄与されるキャパシタンスを考慮する必要がある。このために小型の試験空洞を使用して実験を行った。高透磁率金属磁性体として使用するFINEMETのサイズを、内半径50mm、外半径170mm、幅25mmとし、空洞の底に配置した。水を精製し、その体積抵抗率を10M $\cdot$ cm以上とした。共振周波数の変化を前記空洞の底からの精製水面の関数として測定した。この結果を図6において黒い丸で示す。水面が前記コアの上面を越えると、前記共振周波数は徐々に低下する。前記共振キャパシタンスに対する水のキャパシタンスの寄与は、加速間隙から漏れる電界が水に作用する場合に現れる。スーパーフィッシュ(Superfish)コードを用いた電磁場計算を行い、前記実験と比較した。計算した共振周波数は、水面の関数として変化し、これを図6において黒い正方形で示す。計算は測定と良好に一致した。これらの結果から、電磁場計算によって、前記精製水によって寄与されるキャパシタンスを評価できることがわかった。

【0026】冷却設計を適切に行うために、前記高透磁率金属磁性体の実効伝熱係数を知ることが重要である。このため同じ試験空洞を使用して、FINEMETの実効伝熱係数も測定した。厚さ20 $\mu$ m程度の薄いFINEMETテープを巻きわくの周囲に巻回してトロイダル形状を形成した。1kW程度の高周波電力を前記空洞に供給し、磁性体の温度および水温を測定した。精製水の流量を0.5l/秒とした。図7は、磁性体および水の双方に関する温度を、前記高周波電力を加えた後の時間の関数として示す。この測定から、前記実効伝熱係数が20~30W/m $\cdot$ Kであることがわかり、これはステンレス鋼の実効伝熱係数よりもわずかに大きい。消費高周波電力密度が10W/cm<sup>3</sup>より高い場合でも、前記磁性体の冷却は問題ないことがわかった。

【0027】

【発明の効果】本発明の高加速勾配高周波空洞によれば、50~100KV/m以上の実効電界勾配が達成される。したがって空洞の全長を短くすることができ、このようにすれば、粒子ビームから見た該高周波空洞のインピーダンスは低下し、粒子ビームが誘起する電圧も低くなるので、加速ビーム強度を高めることが容易になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】フェライトおよびFINEMETに関する、代表的な $\mu$ Qf積の $B_{cr}$ における依存性を示すグラフである。

【図2】フェライトおよびFINEMETに関して計算した電力密度に対する実効電界勾配を示すグラフである。

30 【図3】本発明による高加速勾配高周波空洞を組み込んだシンクロトロン構成を示す線図である。

【図4】本発明による高加速勾配高周波空洞の一実施形態の断面図である。

【図5】本発明による高加速勾配高周波空洞の他の実施形態の断面図である。

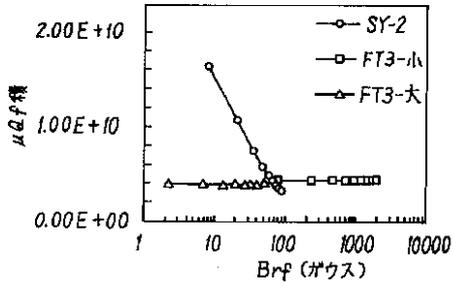
【図6】水面に対する共振周波数を示すグラフである。

【図7】FINEMETおよび水の温度変化を示すグラフである。

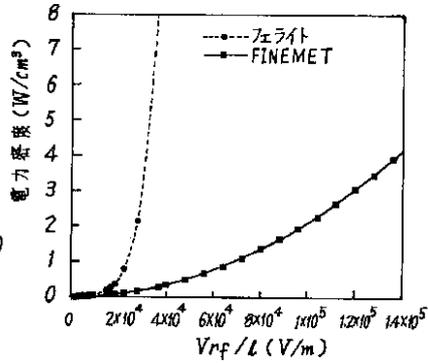
【符号の説明】

- 40 1 入射器  
2 荷電粒子ビーム  
3 電磁石  
4、11 高加速勾配高周波空洞  
12、13 ビームパイプ  
14、15、16、17 高透磁率金属磁性体  
18、19 ステンレスシール箱  
20、21 高周波絶縁シール板  
22、23 高周波直結フィーダ  
24 ループ状結合環

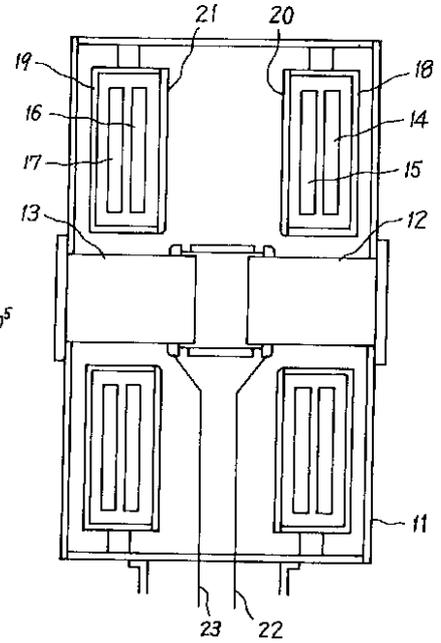
【図1】



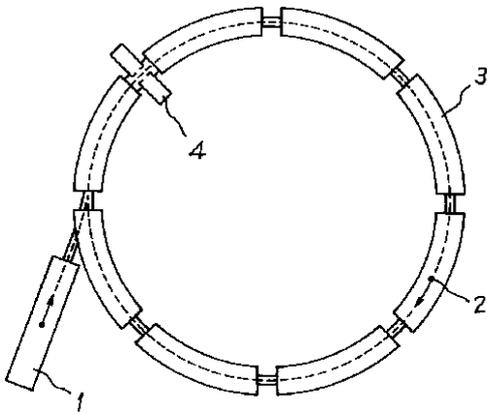
【図2】



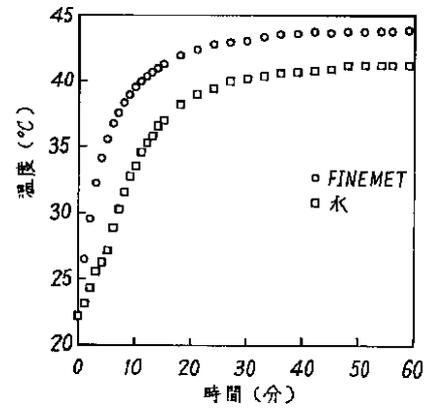
【図4】



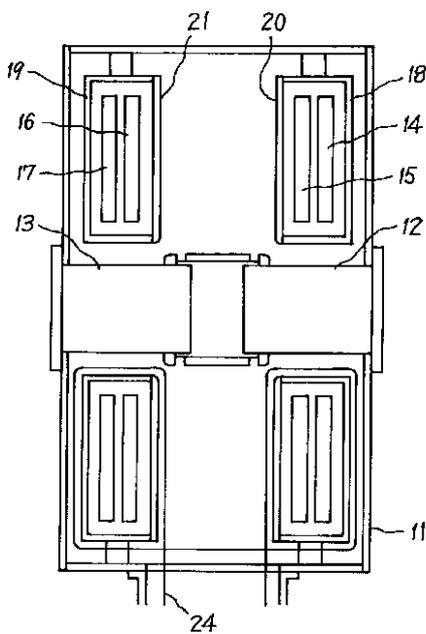
【図3】



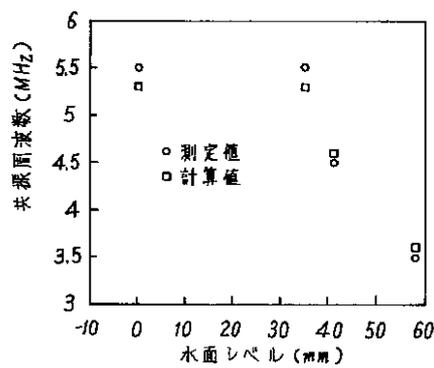
【図7】



【図5】



【図6】



**【手続補正書】****【提出日】**平成11年6月7日**【手続補正1】****【補正対象書類名】**明細書**【補正対象項目名】**請求項1**【補正方法】**変更**【補正内容】**

**【請求項1】** 高加速勾配高周波空洞において、この空洞内に装荷する高透磁率金属磁性体を高透磁率金属磁性体とし、50kV/m以上の加速勾配を得るように構成したことを特徴とする高加速勾配高周波空洞。

**【手続補正2】****【補正対象書類名】**明細書**【補正対象項目名】**請求項3**【補正方法】**変更**【補正内容】**

**【請求項3】** 請求項1または2に記載の高加速勾配高周波空洞において、前記高透磁率金属磁性体を、加速間隙側に面した部分に流れないように循環する冷却媒体によって直接冷却するように構成したことを特徴とする高加速勾配高周波空洞。

**【手続補正3】****【補正対象書類名】**明細書**【補正対象項目名】**0008**【補正方法】**変更**【補正内容】****【0008】**

**【課題を解決するための手段】**本発明による高加速勾配高周波空洞は、この空洞内に装荷する高透磁率金属磁性体を高透磁率金属磁性体とし、50kV/m以上の加速勾配を得るように構成したことを特徴とする。

**【手続補正4】****【補正対象書類名】**明細書**【補正対象項目名】**0014**【補正方法】**変更**【補正内容】****【0014】**

したがって、本発明の他の実施形態による高加速勾配高周波空洞は、前記高透磁率金属磁性体を、加速間隙側に面した部分に流れないように循環する冷却媒体によって直接冷却するように構成したことを特徴とする。