(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3721301号
(P3721301)
(45)発行日　平成17年11月30日(2005.11.30)　(24)登録日　平成17年9月16日(2005.9.16)

(51)Int.Cl.[7]　F I
H01J 49/28　H01J 49/28
B01D 59/48　B01D 59/48

請求項の数 2　(全 10 頁)

(21)出願番号　特願2000-256655(P2000-256655)
(22)出願日　平成12年8月28日(2000.8.28)
(65)公開番号　特開2001-185074(P2001-185074A)
(43)公開日　平成13年7月6日(2001.7.6)
審査請求日　平成13年11月12日(2001.11.12)
(31)優先権主張番号　464518
(32)優先日　平成11年12月15日(1999.12.15)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　505255806
アルキメデス　オペレーティング、エルエルシー
アメリカ合衆国、カリフォルニア、サンディエゴ、イーストゲート　ドライブ　５６６０
(74)代理人　100066692
弁理士　浅村　皓
(74)代理人　100072040
弁理士　浅村　肇
(74)代理人　100072822
弁理士　森　徹
(74)代理人　100087217
弁理士　吉田　裕

最終頁に続く

(54)【発明の名称】プラズマ質量フィルタ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

荷電粒子をそれらの質量に従って分離するための方法であって：

軸（１６）を定めた室（１４）内に、比較的低質量粒子（M_1）および比較的高質量粒子（M_2）を含む多種プラズマを用意する工程；

上記粒子M_1およびM_2を上記軸（１６）周りの、上記粒子の質量に特有な、それぞれの軌道で回転するために、および上記室（１４）内の各上記粒子に対してそれぞれのサイクロトロン周波数（Ω）を発生するために上記室（１４）に交差電磁場（ＥｘＢ）を創る工程；

上記多種プラズマの密度を上記室（１４）内で、上記粒子が他の上記粒子と衝突周波数（ｖ）を有し、上記サイクロトロン周波数（Ω）の上記衝突周波数（ｖ）に対する比を１以上に（Ω／ｖ≧１）維持する工程；並びに

上記比較的高質量粒子（M_2）を上記比較的低質量粒子（M_1）から分離するために上記比較的高質量粒子（M_2）を捕えるためそれらの軌道に収集器を配置する工程を含む方法。

【請求項２】

荷電粒子をそれらの質量に従って分離するための装置（１０）であって：

軸（１６）を定める室（１４）内に、比較的低質量粒子（M_1）および比較的高質量粒子（M_2）を含む多種プラズマを用意するための手段；

上記粒子M_1およびM_2を上記軸（１６）周りの、上記粒子の質量に特有な、

それぞれの軌道で回転するために、および上記室（１４）内の各上記粒子に対してそれぞれのサイクロトロン周波数（Ω）を発生するために上記室（１４）に交差電磁場（ＥｘＢ）を創るための手段；

上記多種プラズマの密度を上記室（１４）内で、上記粒子が他の上記粒子と衝突周波数（ｖ）を有し、上記サイクロトロン周波数（Ω）の上記衝突周波数（ｖ）に対する比を１以上に（Ω／ｖ≧１）維持するための手段；並びに

上記比較的高質量粒子（M_2）を上記比較的低質量粒子（M_1）から分離するために上記比較的高質量粒子（M_2）を捕えるためそれらの軌道に配置した収集器を含む装置。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

この出願は、現在係属中の、１９９８年１１月１６日に提出した米国特許出願第０９／１９２，９４５号の一部係属出願である。この出願第０９／１９２，９４５号の内容をここに参考までに援用する。

【０００２】

【発明の属する技術分野】

本発明は、一般的にはプラズマ中の荷電粒子をそれらそれぞれの質量に従って分離できる装置および器具に関する。更に詳しくは、本発明は、多種プラズマから特定の質量範囲の粒子を抽出するフィルタ装置に関する。本発明は、高質量粒子から低質量粒子を分離するためのフィルタとして特に有用であるが、それだけではない。

【０００３】

【従来の技術】

プラズマ遠心分離機の動作の一般原理は良く知られ且つ良く理解されている。簡単に言えば、プラズマ遠心分離機は、荷電粒子に力を発生し、それがこれらの粒子をそれらの質量に従って互いから分離させる。更に詳しくは、プラズマ遠心分離機は、交差電磁場が荷電粒子に有する効果に依存する。知られるように、交差電磁場は、プラズマ中の荷電粒子を、中心に向く縦軸の周りのそれぞれの螺旋状経路上を運動させてこの遠心分離機を通過させる。荷電粒子がこれらの交差電磁場の影響下で遠心分離機を通過するとき、それらは、勿論、種々の力を受ける。特に、半径方向、即ち、遠心分離機中の粒子回転軸に垂直な方向には、これらの力は：１）この粒子の運動によって生ずる遠心力F_c；２）この電場E_rによってこの粒子に働く電気力F_E；および３）この磁場B_Zによってこの粒子に働く磁気力F_Bである。数学的に、これらの力の各々の大きさは、それぞれ次の様に表す：

$F_c = M r \omega^2$；

$F_E = e E_r$；および

$F_B = e r \omega B_Z$.

但し、

Mは、粒子の質量；

ｒは、粒子の回転軸からの距離；

ωは、粒子の角周波数；

ｅは、粒子の電荷；

Ｅは、電場の強さ；および

B_Zは、磁場の磁束密度である。

【０００４】

プラズマ遠心分離機では、電場を半径方向に内方に向けることが普遍的に認められている。言換えれば、遠心分離機で回転軸からの距離が増すと、正電圧が増す。これらの条件の下で、電気力F_Eは、この粒子に作用する遠心力F_cに対抗し、交差電磁場のＥ×Ｂ回転から生ずる磁気力がこの外向き遠心力を助ける。従って、この遠心分離機の半径方向の平衡条件を次のように表すことができる：

$\Sigma Fr = 0$（半径方向に外が正方向）

$F_c - F_E + F_B = 0$

$M r \omega^2 - e E_r + F_B = 0$ （式１）

式１は、一つは正、一つは負の二つの実数解を有することに気付く、即ち：

$$\omega = -\Omega / 2 \left(1 \pm \sqrt{1 + 4E_r / (r\Omega B_z)}\right)$$

但し、$\Omega = e B_Z / M_c$は、質量Mのイオンのサイクロトロン周波数である。

【０００５】

プラズマ遠心分離機に対して、この目的は、遠心分離機で遠心力F_cが粒子を互いからそれらの質量に従って分離可能とする条件を作るための平衡状態を求めることである。これは、遠心力が、特定の粒子の質量（M）によって、粒子毎に異なるために起るものである。それで、重い質量の粒子は、大きいF_cを受け、小さい遠心力しか受けない軽い質量の粒子より遠心分離機のより外側縁の方へ動く。その結果、相互回転軸から外方に軽い粒子から重い粒子へと順次分布する。しかし、良く知られるように、プラズマ遠心分離機は、全ての粒子を前述の方法で完全には分離していないことは、周知である。

【０００６】

上に式１に関連して示したように、イオンを閉込めるように電場Ｅを選択し、イオンが限定された軌道を示すとき、力平衡を達成できる。本発明のプラズマフィルタでは、遠心分離機と違って、イオンを抽出するために電場を反対符号に選択する。その結果、カットオフ値M_cより大きい質量のイオンは、非限定軌道上にある。カットオフ質量M_cは、電磁場の強さを調整することによって選択できる。このプラズマフィルタの基本的特徴をハミルトニアン・フォーマリズムを使って説明できる。

【０００７】

全エネルギー（位置＋ポテンシャル）は、運動の定数であり、ハミルトン演算子によって表す。

$$H = e\Phi + (P_r^2 + P_z^2)/(2M) + (P_\theta - e\Psi)^2/(2Mr^2)$$

但し、

$$P_r = Mv_r,\ P_\theta = Mrv_\theta + e\Psi,$$

およびP_z＝Mv_zは、それぞれ運動量の成分であり、eΦはポテンシャルエネルギーである。Ψ＝r^2 B_z／２は、磁束関数に関係し、Φ＝V_ctr－αΨは電位である。Ｅ＝－∇Φは、関心のあるフィルタの場合ゼロより大きく選んだ電場である。このハミルトニアンを次のように書直すことができる：

$$H = eV_{ctr} - e\alpha r^2 B_z/2 + (P_r^2 + P_z^2)/(2M) + (P_\theta - er^2 B_z/2)^2/(2Mr^2)$$

Ｐ およびＰ が運動の定数であるように、これらのパラメータがｚ軸に沿って変らないとする。展開し、区分し直して定数項を全て左辺に置くと：

$$H - eV_{ctr} - P_z^2/(2M) + P_\theta\Omega/2 = P_r^2/(2M) + (P_\theta^2/(2Mr^2) + (M\Omega r^2/2)(\Omega/4 - \alpha)$$

但し、$\Omega = e B_z / M$は、サイクロトロン周波数である。

最後の項は、r^2に比例し、それでもし、Ω／４－α＜０ならば、第２項が１／r^2と共に減少するので、P_r^2は、粒子が放射状に移動しても左辺を一定に保つために、増加しなければならない。これは、次の式によって与えられるカットオフ質量より大きい質量に対して軌道が制限されないことに繋がる：

$M_c = e (B_z a)^2 / (8 V_{ctr})$ 但し、ａは、この室の半径である。次も使う：

$$\alpha = (\Phi_o - \Phi)/(\Psi - \Psi_o) = 2\,V_{ctr} / (a^2 B_z) \qquad (式２)$$

但し、$\Phi_0 = V_{ctr}$および$\Psi_0 = 0$一方、ｒ＝ａで、φ＝０および$\Psi = a^2 B_z / 2$それで、例えば、陽子質量M_pに規準化して、式２を書直して高質量を喪失軌道に載せるために必要な電圧を得ることができる。

$$V_{ctr} > 1.2 \times 10^{-1} (a(m)B_z(gauss))^2/(M_C/M_P)$$

【０００８】

従って、装置半径１ｍ、カットオフ質量比１００、および磁場２００Ｇｓは、４８Ｖの電圧を要する。

プラズマ質量フィルタでのカットオフ質量に対する同じ結果は、次に与えられる単純な力平衡式を調べることによっても得られる：

ΣＦｒ＝０（半径方向に外が正方向）

$F_c + F_E + F_B = 0$

$M r \omega^2 + e E_r + e r \omega B_Z = 0$ （式３）

これは式１と電場および磁力の符号だけが異なり、次の解を有する：

$$\omega = \Omega/2\,(1 \pm \sqrt{1 - 4E_r/(r\Omega B_z)}\,)$$

それでもし、$4E_r / r\Omega B_z > 1$ならば、ωが虚根を有し、力平衡を達成できない。シリンダ半径“ａ”、中心電圧V_{ctr}および壁で電圧ゼロのフィルタ装置に対し、カットオフ質量に対する同じ式は次の様になり：

$M_c = e a^2 B_z^2 / (8 V_{ctr})$

荷電粒子の質量Ｍが閾値より大きいとき（$M > M_c$）、この粒子は、壁に当るまで半径方向の外方に動き続け、ところが質量の軽い粒子が含まれ、この装置の出口に集められる。質量の高い粒子も種々の手法を使ってこれらの壁から回収できる。

【０００９】

与えられた装置に対して、式３のM_cに対する値が磁場B_Zの大きさとこの室の中央（即ち、縦軸に沿って）での電圧V_{ctr}によって決ることに気付くことが重要である。これら二つの変数は、設計考慮事項であり、制御可能である。

上に示した数学的計算の結果をより十分に理解するために、プラズマ質量フィルタとプラズマ遠心分離機のそれぞれの動作にかかわる物理的現象の比較がためになる。これら２種類の装置の間に類似性はあるが、これらの類似性は、殆ど重要性がない。例えば、両種の装置が軸方向に向いた磁場を確立する。両方が交差電磁場を確立する（電場の方向が半径方向に互いに反対であるとはいえ）。および、両方が多種プラズマの荷電粒子をそれらの質量に従って互いから分離する意図である。しかし、類似性はそこで終る。

【００１０】

プラズマ質量フィルタとプラズマ遠心分離機の間の重要な差異は、プラズマ遠心分離機が動作上プラズマの中の種々の荷電粒子間の衝突に依存するという事実である。特に、粒子をそれらの質量に従って分離するための作動機構を確立するのは、遠心分離機の中の軽イオンと重イオン間の衝突である。他方、プラズマ質量フィルタは、その動作のためにこの衝突機構は使わない。実際、それと反対に、プラズマ質量フィルタは、プラズマの中の荷電粒子間の衝突の回避に依存する。プラズマ質量フィルタでこれを行う目的は、それによって各荷電粒子に所定の軌道を辿らせることである。すると、プラズマ質量フィルタの中の荷電粒子の分離は、それぞれの粒子の軌道が特定の荷電粒子の質量に従って異なるので、可能であることことになる。この基本的差異がプラズマ質量フィルタとプラズマ遠心分離機の間の更に他の差異をもたらす。

【００１１】

遠心分離機と質量フィルタの動作状況間で、二つの主な相違点に注意すべきである。第１に、従来の遠心分離機での半径方向電場は、内方に向き、全てのイオンを閉込める。個々のイオン軌道の点から見ると、この電場は、外方に向いた遠心力およびｖｅＢ力の平衡をとる唯一の半径方向力である。フィルタでは、この電場が外方に向いてイオンを抽出する。カットオフ質量以下の質量に対しては、今度は内方に向いたｖｘＢ力が外方に向いた電気力および遠心力の平衡をとって半径方向の閉込めを達成できる。しかし、カットオフ質量以上の質量に対して、内方に向いたｖｘＢ力は、外方に向いた電気力および遠心力の平衡をとるには不十分であり、これらのイオンは追出される。

【００１２】

上記の軌道比較は、イオンとイオンの衝突の影響を無視し、それがフィルタと遠心分離機の第２の主な相違点の要因である。フィルタは、衝突が稀であり、それで軌道は基本的に遠心力、ｖｘＢ力および電気力の平衡によって与えられるものであり；分離は、主としてカットオフ質量を超える質量の重い粒子の半径方向放逐から生ずるという状況で動作する。対照的に、遠心分離機は、そのより限られた質量分離を、種々のイオン種を熱力学的平衡状態に追いやる衝突によって達成する。この平衡状態で、軽および重イオン密度の半径方向分布の比は、ガウス分布で、その半値幅は、重いイオンと軽いイオンの間の遠心力の差に依る。

【００１３】

多種プラズマの荷電粒子間の衝突頻度がプラズマの密度に比例することは良く知られている。更に、荷電粒子が他の粒子との衝突を避けることが出来たならば、この妨害されない粒子が交差電磁場によって影響され、所定の軌道を辿れることが知られている。特に、電荷ｅ、および強さＢの磁場に垂直な速度ｖを有する粒子が円形経路に沿って動くことが知られている。これらの条件下で、この粒子がこの円形経路の周りに１秒当りに行う回転数は、サイクロトロン周波数として知られ、数学的に；$\Omega = B_z e / M$として表され、但し、ｍは粒子の質量である。上に示す計算に対応して、サイクロトロン周波数が粒子速度ｖと独立であることに気付くことが重要である。

【００１４】

上に示すように、荷電粒子がプラズマの中の他の荷電粒子との衝突を避けることができることは、プラズマ質量フィルタの動作にとって重要な概念である。衝突を完全に避けられるという絶対的保証は有り得ないが、単純にこの室内のプラズマの密度を減らすことによって衝突の可能性を減らせることは明らかである。これを心に留め、および本発明のため、“衝突密度”を、M_cを決めるための上述の計算がプラズマ質量フィルタの動作を説明するために有効である上限のプラズマ密度と定義する。言換えれば、連続の中で、“衝突密度”は、プラズマ遠心分離機の動作のために有用な高プラズマ密度とプラズマ質量フィルタの動作のために有用な低プラズマ密度の間の遷移点である。実際問題として、プラズマ質量フィルタは、粒子の衝突周波数に対する粒子のサイクロトロン周波数の比が約１を超える、“衝突密度”未満の密度で有効である。

【００１５】

プラズマ質量フィルタの動作をプラズマ遠心分離機の動作と更に対比するために、軽い荷電粒子の軌道がプラズマ質量フィルタでこれらの粒子が後の収集のためにフィルタ室を出る様に確立することを理解すべきである。また、このフィルタ室で荷電平衡を維持するために、電子を、必要に応じて、軽い荷電粒子と共にこの室から除去する。他方、重い荷電粒子の軌道は、軽い荷電粒子の軌道と異なるので、重い荷電粒子を、軽い荷電粒子が移動しない場所にある収集器と接触するように向けることができる。プラズマ遠心分離機は、軌道の差に依存するものでない。実際、上に議論したように、遠心分離機は、さもなければ予測可能な軌道を効果的に混乱させる、粒子間の衝突に依存する。

【００１６】

【発明が解決しようとする課題】

上記に照らし、本発明の目的は、低質量荷電粒子を高質量荷電粒子から効果的に分離するプラズマ質量フィルタを提供することである。本発明の他の目的は、操作者に低質量粒子

と高質量粒子の間の境界を選択可能にする可変設計パラメータを有するプラズマ質量フィルタを提供することである。本発明の更に他の目的は、使用が容易で、製造が比較的簡単で、比較的コスト効果の良いプラズマ質量フィルタを提供することである。

【００１７】

【課題を解決するための手段】

多種プラズマ中の低質量粒子を高質量粒子から分離するためのプラズマ質量フィルタが中空室を囲み、縦軸を形成する円筒形型壁を含む。この室の外側の周りに磁場B_Zを発生する磁気コイルがある。この磁場は、この室内に確立され、この縦軸とほぼ平行に整列されている。また、この室の一端に、半径方向に外方を向き、この磁場と実質的に垂直に向いた電場E_rを発生する一連の電圧制御リングがある。これらそれぞれの配向で、B_ZおよびE_rは、交差電磁場を作る。重要なことは、この電場が縦軸上に正電位V_{ctr}をおよび室の壁でほぼゼロ電位を有することである。

【００１８】

本発明の動作で、磁場B_Zの大きさおよび室の縦軸に沿う正電位V_{ctr}の大きさを設定する。次に、回転する多種プラズマを室内に交差電磁場と相互作用するように作る。更に詳しくは、縦軸と室壁の間に距離“ａ”を有する室に対して、B_ZおよびV_{ctr}を設定し、M_cを次の式によって決める：

$$M_c = e a^2 (B_z)^2 / 8 V_{ctr}$$

多重荷電イオンに対しては、ｅをｚｅによって置換えるべきであり、但し、ｚはイオン荷電状態であり、M_c／ｚが閉込められたイオンを決める。煩瑣を避けるために、この議論ではｚ＝１とするが、分離されるのは荷電する質量であることが明確であるべきである。

【００１９】

従って、多種プラズマ中の全ての粒子中で、カットオフ質量M_cより小さい質量を有する低質量粒子（$M < M_c$）は、それらがこの室を通過中にこの室に閉込められるだろう。他方、カットオフ質量より大きい質量を有する高質量粒子（$M > M_c$）は、室の壁に放出され、従って、この室を通過しないだろう。

【００２０】

このプラズマ質量フィルタの動作で、この室内の多種プラズマの密度は、このプラズマの“衝突密度”以下のレベルに維持する。特に、この発明のために、この“衝突密度”を、粒子のサイクロトロン周波数（Ω）のそれらの衝突周波数（ｖ）に対する比が約１より大きい（$\Omega / v \geqq 1$）密度であるとして定義する。それで、プラズマが薄ければ薄い程、サイクロトロン周波数の衝突周波数に対する比の値が大きいだろう。多種プラズマの範囲内で、この比がプラズマの異なる領域で異なる値をもつことが最も起りそうである。典型的には、高密度（即ち、この比がほぼ１に等しいところ）がプラズマの中心またはその近くにあり、一方薄いプラズマ（即ち、この比が約１０程になるところ）は、プラズマの周辺近くにあるだろう。

【００２１】

プラズマ質量フィルタのスループットを、フィルタを大きくするか、多種プラズマの密度を増すか、プラズマをこのフィルタを通してより速く動かすか、またはこれらの可能性の種々の態様の組合せによって増すことができることは自明である。しかし、フィルタの機能上の形態を支配するかも知れない、幾つかの実際上の考慮事項がある。一方で、フィルタによって処理するとき、多種プラズマが薄ければ薄い程、重いイオンを軽いイオンから分離する際にフィルタの効率が良い。しかし、多種プラズマのが薄いと、低スループットの結果となる。他方で、多種プラズマの濃度を増すことによって、スループットを増すとき、プラズマの中の粒子の衝突周波数も増すだろう。ここでの結果は、スループットは増すが、粒子分離の効果性が減るということである。その上、プラズマがフィルタを通過できる速さに実際的制限がある。全ての場合に、粒子分離の品質とスループットの増加の間のトレードオフが、プラズマ質量フィルタの動作パラメータｑを確立するときに重要な考慮事項である。

【００２２】

【発明の実施の形態】
この発明それ自体は勿論、この発明の新規な特徴が、そこ構造およびその作用の両方に関して、添付の図面を添付の説明と共に検討すれば最も良く理解できよう。それらの図面で、類似の参照文字は類似の部品を指す。
図１を参照すると、本発明によるプラズマ質量フィルタを示し、全体を１０で指す。図示のように、フィルタ１０は、室１４を囲み、および縦軸１６を形成する、ほぼ円筒形の形状の壁１２を含む。室１４の実際の寸法は、完全にではないが、幾分設計選択の問題である。重要なことは、縦軸１６と壁１２の間の半径方向距離“ａ”がフィルタ１０の動作に影響し、および、ここの他のところではっきり示すように、考慮しなければならないパラメータであることである。
図１に、フィルタ１０が、室１４を囲むように壁１２の外面に取付けた複数の磁気コイル１８を含むことも示す。関連技術で良く知られる方法で、コイル１８は、活性化され、この室内に実質的に縦軸１６に沿って向けられた成分B_Zを有する磁場を作ることができる。更に、フィルタ１０は、複数の電圧制御リング２０を含み、電圧リング２０ａ～２０ｃがその代表である。図示のように、これらの電圧制御リング２０ａ～２０ｃは、円筒形壁１２の一端に位置し、且つ一般に縦軸１６に実質的に垂直な平面内にある。この組合せで、半径方向に向いた電場E_rを発生することができる。電圧制御のための代替構成は、図２に示す螺旋状電極２０ｄである。
【００２３】
本発明のプラズマ質量フィルタ１０用に、磁場B_Zおよび電場E_rは、特別に交差電磁場を作るように向けられている。当業者に良く知られているように、交差電磁場は、荷電粒子（即ち、イオン）を、図１に示す経路２２のような、螺旋状経路上を動かさせる。実際、交差電磁場がプラズマ遠心分離機用に広く使われていることが良く知られている。しかし、プラズマ遠心分離機とは全く違って、本発明のプラズマ質量フィルタ１０は、縦軸１６に沿う電圧V_{ctr}が、通常ゼロ電圧である、壁１２での電圧に比べて、正電圧であることを要する。
【００２４】
本発明のプラズマ質量フィルタ１０の動作では、回転する多種プラズマ２４を室１４の中へ噴射する。交差電磁場の影響の下で、プラズマ２４に閉込められた荷電粒子が縦軸１６の周りを一般的に、経路２２に類似する、螺旋状経路に沿って移動する。更に詳しくは、図１に示すように、多種プラズマ２４は、質量が互いに異なる荷電粒子を含む。開示目的で、プラズマ２４は、少なくとも二つの異なる種類の荷電粒子、即ち、高質量粒子２６と低質量粒子２８を含む。しかし、本発明のために意図するように、低質量粒子２８しか実際に室１４を通過できないことが起るかも知れない。
【００２５】
上に示した数学的計算によれば、低質量粒子２８と高質量粒子２６の間の境界がカットオフ質量M_cで、次の式によって確立できる：
$M_c = e a^2 (B_z)^2 / 8 V_{ctr}$
上の式で、ｅは電子の電荷、ａは室１４の半径、B_zは磁場の大きさ、およびV_{ctr}は縦軸１６に沿う正電圧である。この式のこれらの変数の中で、ｅは既知定数である。他方、“ａ”、B_zおよびV_{ctr}は、全てプラズマ質量フィルタ１０の動作のために特別に設計または確立することができる。
【００２６】
この交差電磁場の構成および、重要なことに、縦軸１６に沿う正電圧V_{ctr}のために、このプラズマ質量フィルタ１０は、多種プラズマ２４の荷電粒子をそれらが室１４を通過するときに違う行動をするようにする。特に、荷電高質量粒子２６（即ち、$M > M_c$）は、室１４を通過できず、その代りに壁１２へ放出される。他方荷電低質量粒子２８（即ち、$M < M_c$）は、それらが室１４を通過する間、室１４に閉込められる。それで、低質量粒子２８は、室１４を出て、それによって高質量粒子２６から効果的に分離される。
【００２７】

本発明のプラズマ質量フィルタ１０の動作中、室１４の中の多種プラズマ２４の密度は、プラズマ２４の“衝突密度”より下に維持される。ここで定義したように、この“衝突密度”は、密度の連続の中で、プラズマ２４の中の粒子２６、２８のサイクロトロン周波数（Ω）の粒子２６、２８の衝突周波数（ｖ）に対する比が約１より大きい（Ω／ｖ≧１）点として確立される。この比が１を超える値に対して（即ち、プラズマ２４の密度が減少するところ）、ここに開示した計算は、高質量粒子２６の軌道と低質量粒子２８の軌道の間の差を効果的に予測する。

【００２８】

【発明の効果】

図３に、粒子分離とスループットの間の関係の理想化した表現を、プラズマ質量フィルタ１０の動作にかかわるトレードオフを説明し且つプラズマ質量フィルタ１０と遠心分離機（図示せず）の間の動作上の差を強調するために示す。特に、グラフ線３０は、プラズマ質量フィルタ１０の意図する動作に関し、一方グラフ線３２は、一般的にプラズマ遠心分離機の期待性能に関する。更に、図３で意図するように、フィルタ１０の、または遠心分離機の、スループットがプラズマ２４の密度の関数であることを認識すべきである。

【００２９】

上記を心に留めて、グラフ線３０は、プラズマ２４のスループットおよび密度が増すと、フィルタ１０による粒子２６、２８の分離の品質が必然的に減少することを表示すように図３に示す。この傾向は、大部分、プラズマ２４での粒子衝突の可能性の増加による。点３４を超えるスループットの増加（即ち、プラズマ２４の密度の増加）に対して、プラズマ質量フィルタ１０と遠心分離機の両方に対する期待動作パラメータがすっかり似ているようになることが分るだろう。他方、点３４をプラズマ２４の“衝突密度”を表すように使って、フィルタ１０が低スループット（密度）でプラズマ２４の中の粒子２６、２８を分離するために遠心分離機よりかなり効率が良いことに気付くだろう。これらの同じ低スループット（密度）の条件の下で、遠心分離機は、粒子衝突の可能性が低く、遠心分離機の動作に有効な衝突機構が完全には実施されないので、それ程効率的でない。破線３２によって示すように、低スループット（密度）条件での遠心分離機の動作は、比較的効率が悪い。従って、効率的粒子分離が最も重要な関心事であるとき、プラズマ質量フィルタ１０を使い、上に示す数学的処理に従って構成すべきである。重要なことは、プラズマ質量フィルタ１０をここで定義する“衝突密度”以下の密度で作動すべきことである。

【００３０】

ここに図示し且つ詳細に説明した特別のプラズマ質量フィルタは、ここに先に述べた目的を達成しおよび利点をもたらすものであるが、発明の現在好適な実施態様の例示に過ぎず、また請求項に記載する範囲以内でここの示す構造または設計の詳細に何の制限も意図しないことを理解すべきである。

【図面の簡単な説明】

【図１】明確さのために一部破断した、プラズマ質量フィルタの斜視図である。

【図２】電圧制御装置の代替実施例の平面図である。

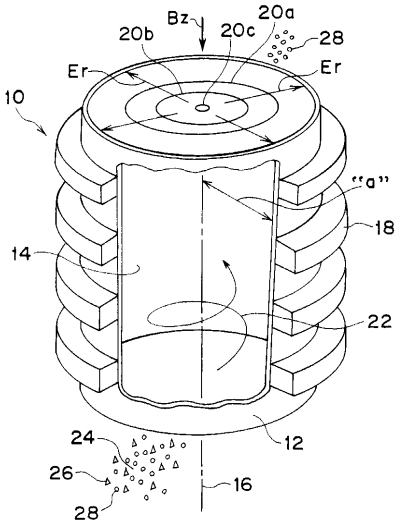
【図３】粒子分離とスループットの関係を示すグラフである。

【符号の説明】

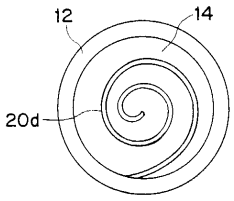
１０　荷電粒子分離装置
１２　壁
１４　室
１６　縦軸
１８　コイル
２０　電極
２０ａ　導電性リング
２０ｃ　導電性リング
２０ｄ　螺旋状電極
２２　経路

Ｂ　磁場
ＥｘＢ　交差電磁場
M_1　低質量粒子
M_2　高質量粒子
ν　衝突周波数
Ω　サイクロトロン周波数

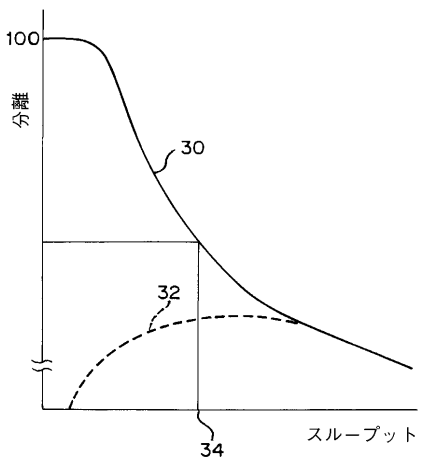
【図１】



【図２】



【図３】



フロントページの続き

(72)発明者　チヒロ　オーカワ
アメリカ合衆国　カリフォルニア、ラジョラ、　ラジョラ　ファームズ　ロード　９５１５

審査官　堀部　修平

(56)参考文献　米国特許第０２７２４０５６（ＵＳ，Ａ）
特開平１１－３４５５９１（ＪＰ，Ａ）
特開平０９－２１９１７３（ＪＰ，Ａ）
特開昭６２－２５６３５４（ＪＰ，Ａ）
特開昭６０－０８４７５３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.[7]，ＤＢ名)
H01J 49/00 - 49/42
B01D 59/48