

(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2023-88425
(P2023-88425A)

(43)公開日

令和5年6月27日(2023. 6. 27)

(51)Int. Cl.

H05H 9/00 (2006.01)

F I

H05H 9/00

D Z A A

テーマコード(参考)

2G085

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 14 頁)

(21)出願番号 特願2021-203122(P2021-203122)

(22)出願日 令和3年12月15日(2021. 12. 15)

(71)出願人 504151365
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
茨城県つくば市大穂1番地1

(74)代理人 100163533
弁理士 金山 義信

(74)代理人 100199842
弁理士 坂井 祥平

(72)発明者 山中 将
茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

Fターム(参考) 2G085 AA04 BA05 BD02 BE02 BE03
BE05 CA03 CA13 EA02 EA07

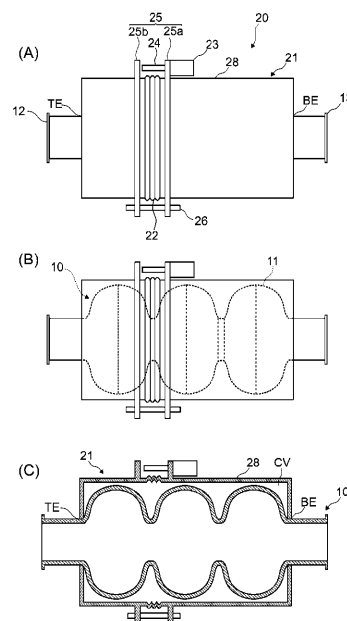
(54)【発明の名称】共振周波数調整装置

(57)【要約】

【課題】 簡易な構造の共振周波数調整装置の提供

【解決手段】 荷電粒子を加速するための超伝導加速空洞の共振周波数を調整する共振周波数調整装置であって、低温流体、及び、超伝導加速空洞を収容し、超伝導加速空洞を低温流体に浸漬するための容器と、直動アクチュエータと、を有し、容器は、その両端部において超伝導加速空洞と一体として構成され、長手方向に沿って伸縮する伸縮部と、伸縮部を跨いで、かつ、伸縮部とは異なる位置において、長手方向に沿って互に対向するように、容器の基体から張り出して配置された少なくとも一対のフランジと、を有し、直動アクチュエータは、フランジの一方に、基体と接触しないように固定され、直動アクチュエータの作動軸の進退動作により、対向する他方のフランジを長手方向に沿って変位させる、共振周波数調整装置。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

荷電粒子を加速するための超伝導加速空洞の共振周波数を調整する共振周波数調整装置であって、

低温流体、及び、前記超伝導加速空洞を収容し、前記超伝導加速空洞を前記低温流体に浸漬するための容器と、

直動アクチュエータと、を有し、

前記容器は、その両端部において前記超伝導加速空洞と一体として構成され、

長手方向に沿って伸縮する伸縮部と、

前記伸縮部を跨いで、かつ、前記伸縮部とは異なる位置において、前記長手方向に沿って互いに対向するように、前記容器の基体から張り出して配置された少なくとも一対のフランジと、を有し、

前記直動アクチュエータは、前記フランジの一方に、前記基体と接触しないように固定され、

前記直動アクチュエータの作動軸の進退動作により、対向する他方の前記フランジを前記長手方向に沿って変位させる、共振周波数調整装置。

【請求項 2】

前記直動アクチュエータが、断熱材を介して前記フランジに固定される、請求項 1 に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 3】

前記伸縮部がベローズを含む、請求項 1 又は 2 に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 4】

前記伸縮部の伸縮動作をガイドするガイド軸を有し、

前記ガイド軸は、長軸が前記長手方向と略同一となるように、一対の前記フランジによって支持される、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 5】

前記ガイド軸は、一対の前記フランジによって、前記長手方向に沿って摺動可能に支持される、請求項 4 に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 6】

前記ガイド軸と、前記直動アクチュエータとが、前記容器の中心軸に対して略回転対称な位置にそれぞれ配置される、請求項 4 に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 7】

複数の前記直動アクチュエータを有する、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 8】

複数の前記直動アクチュエータが、前記中心軸に対して回転対称な位置にそれぞれ配置される、請求項 6 に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 9】

前記直動アクチュエータが、波動歯車装置を含む回転運動部と、前記回転運動部から伝達される回転運動を直動運動に変換して出力する直動部とを含む、請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 10】

前記直動部は、ナットと、送りねじとを含み、

前記波動歯車装置は、環状の剛性内歯歯車と、この内側に配置された環状の可撓性外歯歯車と、この内側にはめ込まれた波動発生器とを含み、

前記ナットは、前記剛性内歯歯車、又は、前記可撓性外歯歯車に固定され、前記ナットの回転を前記送りねじの直動運動に変換する、請求項 9 に記載の共振周波数調整装置。

【請求項 11】

前記ナットが、前記可撓性外歯歯車に固定される、請求項 10 に記載の共振周波数調整装置。

10

20

30

40

50

【請求項 1 2】

前記共振周波数調整装置が収容される真空容器と前記直動アクチュエータとの間を熱的に接触させるための、熱伝導部材を更に有する、請求項 1 ~ 1 1 のいずれか 1 項に記載の共振周波数調整装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、荷電粒子を加速するための超伝導加速空洞の共振周波数を調整する共振周波数調整装置に関する。

【背景技術】**【0002】**

高周波共振を利用して荷電粒子を加速する加速空洞では、使用する高周波電力の周波数と、空洞の形状によって決定される空洞共振周波数とを一致させるように設計され、使用される。

しかし、製造上の誤差、温度変化による空洞の形状変化、及び、加速器の運転条件等によって、高周波電力周波数と空洞共振周波数との間にずれが発生する場合がある。

【0003】

特に、低温流体（一般に液体ヘリウム）によって、空洞材料の超伝導臨界温度以下に保持した状態で用いられる超伝導加速空洞においては、運転中に、冷却による収縮等に起因して「ずれ」が発生する場合があり、これを補正する必要がある。

【0004】

図 1 は、一般的な超伝導加速空洞の模式図である。超伝導加速空洞 1 0 は、中空の円筒状であり、その中途に、椀型部材の開口同士をつなぎ合わせた形状の空洞（セル） 1 1 が 9 個、直列に繋ぎ合わされている。超伝導状態で使用するために、材質はニオブであることが多い。

両端にはそれぞれ、荷電粒子の導入 / 導出のためのポート 1 2、及び、ポート 1 3 が配置され、両端側には、カブラ 1 4、1 5 が配置されている。

【0005】

このような超伝導加速空洞 1 0 を、例えば、共振周波数 1 . 3 G H z、~ 4 K（ケルビン）の運転条件で運転する場合、共振周波数の補正のために、運転中に、長手方向に数ミリメートル程度の調整（一般的に、伸長）が必要になる場合がある。この場合、一形態として、必要な応力は 0 . 1 ~ 1 0 0 k N 程度であることがある。

【0006】

このような周波数のずれを調整するための装置として、超伝導加速空洞に共振周波数調整装置（「周波数チューナー」と呼ばれることもある）が取り付けられる。共振周波数調整装置は、超伝導加速空洞を弾性変形させ、共振周波数を調整する。

特許文献 1、及び、特許文献 2 には、加速空洞の周波数調整に関する発明が記載されている。

【先行技術文献】**【特許文献】****【0007】**

【特許文献 1】 米国特許第 6 4 4 5 2 6 7 号明細書

【特許文献 2】 米国特許第 6 6 5 7 5 1 5 号明細書

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】****【0008】**

超伝導加速空洞の周波数調整は、加速器の運転前に実施されるものと、運転中に実施されるものがある。運転前に実施される周波数調整は、設計的なもので、例えば、空洞の内表面を研磨したり、空洞を塑性変形させたりして行われる。

【0009】

10

20

30

40

50

一方、運転中に実施される共振周波数調整は、その調整の範囲が運転前のものと比較して狭く、一般に、空洞に対して、変位が数マイクロメートル程度の微動、又は、変位が数ミリメートル程度の粗動を与え、空洞を弾性変形させて行われることが多い。上述のとおり、この際、共振周波数調整装置（チューナー）が使用される。

【 0 0 1 0 】

ところで、超伝導加速空洞は、構成材料（例えばニオブ）の超伝導臨界温度以下に保持される必要があるため、一般に低温流体（液体ヘリウム）を満たした容器（一般に、「ヘリウムタンク」と呼ばれる）内に收容される。更に、上記容器は、複数の断熱シールドで囲まれ、その全体が真空容器に收容され、「クライオモジュール」と呼ばれる一体型の大型設備として加速器に組み込まれる。

したがって、一旦、加速器の運転が開始されると、クライオモジュールから共振周波数調整装置を取り出したり、交換したりすることは難しく、共振周波数調整装置には、極低温、かつ、真空下という特殊な環境における、高い信頼性が求められる。

また、上述のとおり、超伝導加速空洞は、何重にも容器、断熱シールドで覆われており、組み立て作業にも困難を伴う。したがって、共振周波数調整装置は、取り付けが容易で、コンパクトであることが好ましい。

【 0 0 1 1 】

この点において、特許文献 1、及び、特許文献 2 に記載された共振周波数調整装置は、機構が複雑で信頼性が十分とは言えず、また、取り付けも容易ではなかった。そこで、本発明は、簡易な構造の共振周波数調整装置を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

本発明者らは、上記課題を解決すべく鋭意検討した結果、以下の構成により上記課題を解決することができることを見出した。

【 0 0 1 3 】

[1] 荷電粒子を加速するための超伝導加速空洞の共振周波数を調整する共振周波数調整装置であって、低温流体、及び、上記超伝導加速空洞を收容し、上記超伝導加速空洞を上記低温流体に浸漬するための容器と、直動アクチュエータと、を有し、上記容器は、その両端部において上記超伝導加速空洞と一体として構成され、長手方向に沿って伸縮する伸縮部と、上記伸縮部を跨いで、かつ、上記伸縮部とは異なる位置において、上記長手方向に沿って互いに対向するように、上記容器の基体から張り出して配置された少なくとも一対のフランジと、を有し、上記直動アクチュエータは、上記フランジの一方に、上記基体と接触しないように固定され、上記直動アクチュエータの作動軸の進退動作により、対向する他方の上記フランジを上記長手方向に沿って変位させる、共振周波数調整装置。

[2] 上記直動アクチュエータが、断熱材を介して上記フランジに固定される、[1] に記載の共振周波数調整装置。

[3] 上記伸縮部がベローズを含む、[1] 又は [2] に記載の共振周波数調整装置。

[4] 上記伸縮部の伸縮動作をガイドするガイド軸を有し、上記ガイド軸は、長軸が上記長手方向と略同一となるように、一対の上記フランジによって支持される、[1] ~ [3] のいずれかに記載の共振周波数調整装置。

[5] 上記ガイド軸は、一対の上記フランジによって、上記長手方向に沿って摺動可能に支持される、[4] に記載の共振周波数調整装置。

[6] 上記ガイド軸と、上記直動アクチュエータとが、上記容器の中心軸に対して略回転対称な位置にそれぞれ配置される、[4] に記載の共振周波数調整装置。

[7] 複数の上記直動アクチュエータを有する、[1] ~ [6] のいずれかに記載の共振周波数調整装置。

[8] 複数の上記直動アクチュエータが、上記中心軸に対して回転対称な位置にそれぞれ配置される、[6] に記載の共振周波数調整装置。

[9] 上記直動アクチュエータが、波動歯車装置を含む回転運動部と、上記回転運動部から伝達される回転運動を直動運動に変換して出力する直動部とを含む、[1] ~ [8]

10

20

30

40

50

のいずれかに記載の共振周波数調整装置。

[1 0] 上記直動部は、ナットと、送りねじとを含み、上記波動歯車装置は、環状の剛性内歯歯車と、この内側に配置された環状の可撓性外歯歯車と、この内側にはめ込まれた波動発生器とを含み、上記ナットは、上記剛性内歯歯車、又は、上記可撓性外歯歯車に固定され、上記ナットの回転を上記送りねじの直動運動に変換する、[8]に記載の共振周波数調整装置。

[1 1] 上記ナットが、上記可撓性外歯歯車に固定される、[1 0]に記載の共振周波数調整装置。

[1 2] 上記共振周波数調整装置が収容される真空容器と上記直動アクチュエータとの間を熱的に接触させるための、熱伝導部材を更に有する、[1] ~ [1 1]のいずれかに記載の共振周波数調整装置。

10

【発明の効果】

【 0 0 1 4 】

本発明によれば、簡易な構造の共振周波数調整装置を提供できる。

【 0 0 1 5 】

本発明の共振周波数調整装置は、構造が簡易であり、更に、所定の位置に設置された直動アクチュエータの作動軸の進退方向と、超伝導加速空洞の伸縮方向とが、ほぼ揃っているため、機械的に「噛む」等の故障が発生しにくく、交換・メンテナンスが困難な環境下でも長期間、安定して動作できる。

【 0 0 1 6 】

また、直動アクチュエータが断熱材を介してフランジに固定されている場合、直動アクチュエータの発熱が低温流体の容器により伝わりにくく、(真空下で用いられるために、空気による熱伝導もほばないため)超伝導加速空洞の運転温度に与える影響がより少ない。

20

【 0 0 1 7 】

また、直動アクチュエータに加えてガイド軸を含むガイド機構を有する場合、よりスムーズに容器を伸縮させることができるため、結果として、よりスムーズに超伝導加速空洞を伸縮させ、共振周波数の調整ができる。

【 0 0 1 8 】

また、ガイド軸と直動アクチュエータとが回転対称な位置に配置されているとよりバランスに優れ、共振周波数調整装置が直動アクチュエータを1つだけ有している場合でもよりスムーズに共振周波数の調整ができる。

30

【 0 0 1 9 】

また、共振周波数調整装置が複数の直動アクチュエータを有する場合、より大きな力でより安定的に共振周波数の調整ができる。また、これらが回転対称な位置に配置される場合、より安定的に共振周波数の調整ができる。

【 0 0 2 0 】

直動アクチュエータが波動歯車装置を含む場合、減速比を大きくしやすく、より小型であっても十分な力を得ることができるため、直動アクチュエータをより小型化できる。このため、より狭いスペースにも設置することができるため、医療機関等に設置される小型加速器にも適用できる。

40

【 0 0 2 1 】

波動歯車装置の出力部から得られる回転運動をナットによって直動運動に変換することで、より簡易な構造で直動アクチュエータが実現できる。

【 0 0 2 2 】

真空容器と直動アクチュエータとを熱的に接触させるための熱伝導部材(例えば、リボン上の金属板等)を有する場合、真空下で使用されるために放熱が困難になりやすい直動アクチュエータをより冷却しやすくなる。また、直動アクチュエータの発熱を低温流体の容器により伝えにくくできるため、加速器をより安定的に運転できる。

【図面の簡単な説明】

50

【 0 0 2 3 】

【図 1】一般的な超伝導加速空洞の模式図である。

【図 2】本発明の第 1 実施形態に係る共振周波数調整装置の説明図である。

【図 3】直動アクチュエータ 2 3 の一実施形態の説明図である。

【図 4】本発明の第 2 実施形態に係る共振周波数調整装置の説明図である。

【図 5】本発明の第 3 実施形態に係る共振周波数調整装置の説明図である。

【図 6】本発明の第 3 実施形態に係る共振周波数調整装置の変形例の説明図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 4 】

以下、本発明について詳細に説明する。

10

以下に記載する構成要件の説明は、本発明の代表的な実施形態に基づいてなされることがあるが、本発明はそのような実施形態に制限されるものではない。

なお、本明細書において、「～」を用いて表される数値範囲は、「～」の前後に記載される数値を下限値及び上限値として含む範囲を意味する。

【 0 0 2 5 】

また、以下に示す実施形態は、本発明の技術的思想を具体化した一例であって、本発明の技術的思想は、構成部品の材質、形状、構造、及び、配置等を下記の実施形態に特定するものではない。また、図面は模式的なものである。そのため、厚みと平面寸法との関係、比率等は現実のものとは異なる場合があり、また、図面相互間においても互いの寸法の関係や比率が異なることがある。

20

【 0 0 2 6 】

[第 1 実施形態]

本発明の第 1 実施形態に係る共振周波数調整装置について、図面を参照しながら説明する。図 2 は、本発明の第 1 実施形態に係る共振周波数調整装置の説明図である。図 2 中 (A) は、上記共振周波数調整装置の模式図であり、(B) は、上記共振周波数調整装置の容器内に收容された超伝導加速空洞を示す模式図であり、(C) は、共振周波数調整装置の断面模式図である。

【 0 0 2 7 】

共振周波数調整装置 2 0 は、低温流体、及び、超伝導加速空洞 1 0 を收容し、超伝導加速空洞 1 0 を低温流体に浸漬するための円筒状の容器 2 1 と、直動アクチュエータ 2 3 とを有する。

30

なお、図 2 中、容器 2 1 は円筒状であるが、上記に制限されず、他の形状であってもよい。容器 2 1 は、例えば、(多) 角筒状等であってもよい。

【 0 0 2 8 】

図 2 において、超伝導加速空洞 1 0 は、3 つのセル 1 1 が直列に連結したものである。しかし、本実施形態に係る共振周波数調整装置を適用できる超伝導加速空洞は、上記に制限されず、図 1 に示されるような、セル 1 1 を 9 個有しているものであってもよい。超伝導加速空洞 1 0 が有するセル 1 1 の数は特に制限されず、一形態として、1 個 ~ 2 0 個が好ましい。なお、図 2 においては、カブラ 1 4、1 5、及び、これに接続される導波管等の図示は省略されている。

40

【 0 0 2 9 】

超伝導加速空洞 1 0 と、容器 2 1 との間の空間 C V には低温流体が満たされる。低温流体の種類としては特に制限されず、超伝導加速空洞 1 0 の材質に応じた超伝導臨界温度以下を考慮して適宜選択される。一形態として、ニオブ製の超伝導加速空洞 1 0 を用いる場合、低温流体は液体ヘリウムであることが好ましい。

なお、本明細書において、低温とは、- 1 5 0 以下と意味し、- 1 8 3 以下が好ましい。また、本明細書において極低温とは、「低温」よりも更に低い温度領域を意味し、一形態として、0 . 0 1 ~ 4 K が好ましい。上記低温流体は、極低温流体であることが好ましい。

【 0 0 3 0 】

50

超伝導加速空洞 10 は、その両端（符号「TE」「BE」）において、容器 21 と一体として構成されている。一般に、容器 21 は、超伝導加速空洞 10 の材質と熱膨張率が近いことが好ましく、材質としては、チタニウム（Ti）又はその合金が用いられることが多い。一形態として、超伝導加速空洞 10 と容器 21 とは、端部 TE、及び、BE において溶接され、一体化されている。

【0031】

超伝導加速空洞 10 と容器 21 とがその両端で一体とされているため、これらは連動して変形する。すなわち、温度、及び/又は、測定条件の影響により超伝導加速空洞 10 が変形（伸縮）する場合、容器 21 も連動して伸縮し、逆に、容器 21 が伸縮する場合、超伝導加速空洞 10 も伸縮する。

【0032】

容器 21 は、円筒状の基体 28 を有しており、その胴部に、周方向にわたって基体 28 と一体とされたペローズ 22 が配置されており、容器 21 の長手方向に変形可能になっている。

ペローズ 22 が伸縮すると、容器 21 は長手方向に伸縮し、結果として、超伝導加速空洞 10 をこれに追従して伸縮させることができる。

なお、本実施形態において、容器 21 は、単式のペローズ 22 を有しているが、容器 21 が有する伸縮部は上記に制限されず、複数のペローズからなる複式のペローズであってもよいし、その他の公知の伸縮機構を用いることもできる。

【0033】

更に、容器 21 は、上記ペローズ 22 を跨いで、かつ、ペローズ 22 とは異なる位置において、容器 21 の長手方向に沿って互いに対向するように、基体 28 から張り出して配置された一对のフランジ 25 を有する。

【0034】

なお、図 2 において、一对のフランジ 25 を構成するフランジ 25 a、及び、フランジ 25 b は、いずれも円盤状で同一の形状である。しかし、本実施形態に係る共振周波数調整装置において、容器 21 が有する一对のフランジ 25 は、ペローズ 22 を跨いで、かつ、ペローズ 22 とは異なる位置において、容器 21 の長手方向に沿って互いに対向するように、容器 21 の基体 28 から張り出して配置されていれば、形状は特に制限されない。

例えば、共振周波数調整装置 20 において、フランジ 25 a 及び 25 b は、基体 28 の周方向の全体にわたって設けられているが、周方向の一部に突起状に設けられたものであってもよい。

【0035】

図 2 に戻り、フランジ 25 a には、直動アクチュエータ 23 が固定されている。一方、フランジ 25 a に対して、ペローズ 22 を跨いで反対側には、容器 21 の長手方向に沿って対向するように、フランジ 25 b が配置されている。直動アクチュエータ 23 の作動軸である、送りねじ 24 を前進させると、フランジ 25 b が容器 21 の軸方向に沿って押され、ペローズ 22 が伸長する。容器 21 と超伝導加速空洞 10 は、端部 TE、及び、端部 BE において一体として構成されているため、ペローズ 22（すなわち容器 21）の伸長に追従して、伸長する。

【0036】

なお、このときの伸長（変位）量としては特に制限されず、共振周波数に応じて適宜調整されればよいが、上述のとおり、共振周波数が 1.3 GHz、9 個のセルで構成される超伝導加速空洞の場合、一形態として、20 mm 以下が好ましい。下限は特に制限されないが、一形態として、0.01 mm 以上が好ましい。

この変位量は、超伝導加速空洞 10 の弾性変形可能な範囲であることが好ましい。変位量が弾性変形可能な範囲であると、送りねじ 24 を後退させるだけで、弾性力により超伝導加速空洞 10 を収縮させることができるため、共振周波数の調整がより容易になる。

【0037】

共振周波数調整装置 20 は、直動アクチュエータ 23 を駆動するだけで、容器 21 を伸

縮させることができる。容器 2 1 は両端において超伝導加速空洞 1 0 と一体とされているため、上記によって、超伝導加速空洞 1 0 を伸縮させ、所望の共振周波数に調整することができる。

【 0 0 3 8 】

共振周波数調整装置 2 0 は、直動アクチュエータ 2 3 の作動軸の移動方向と、超伝導加速空洞の伸縮方向とが、ほぼ揃っているため、機械的に「噛む」等の故障が発生しにくい。駆動軸と伸縮方向とがほぼ直交しているような従来技術と比較すると、より優れた信頼性を有する。これは、クライオモジュールの一部として加速器に組み込まれ、容易にメンテナンス等が行えないという特殊な環境下で稼働する共振周波数調整装置 2 0 にとって、より有利な特徴の一つである。

10

【 0 0 3 9 】

また、メンテナンスが必要になった場合であっても、共振周波数調整装置 2 0 は、部品点数の少ない簡易な構造であり、多くの場合、直動アクチュエータ 2 3 を交換するだけで十分な場合が多い。特に、共用施設である大型加速器、及び、医療施設等に設置される加速器に共振周波数調整装置を組み込む場合、メンテナンスに要する時間（ダウンタイム）を短くすることも求められる。共振周波数調整装置 2 0 は、ダウンタイムをより短縮化することができる。

【 0 0 4 0 】

また、共振周波数調整装置 2 0 において、直動アクチュエータ 2 3 は、フランジ 2 5 a に固定されているが、反対側のフランジ 2 5 b に固定されていてもよい。本発明の共振周波数調整装置においては、直動アクチュエータ 2 3 を一對のフランジのどちらに固定するかは任意であり、配置の自由度が高い。

20

共振周波数調整装置を医療機関等に設置される小型の加速器に組み込もうとする場合、クライオモジュール内における、共振周波数調整装置を配置すべきスペースが狭小となったり、形状に制限があったりする場合も多い。このような場合においても、本実施形態に係る共振周波数調整装置は、部品配置の自由度が高いため、より容易に組み込むことができる。

【 0 0 4 1 】

次に、直動アクチュエータ 2 3 の構成について説明する。

図 3 は、直動アクチュエータ 2 3 の一実施形態の説明図である。直動アクチュエータ 2 3 は、モータ（図示せず）、及び、このモータの回転運動を所定の減速比で減速して出力する波動歯車装置 3 0 を含む回転運動部と、上記回転運動部からの回転運動を直動運動に変換して出力する直動部 5 0 とを含む。

30

【 0 0 4 2 】

このうち、回転運動部を構成する波動歯車装置 3 0 は、環状の剛性内歯歯車 3 1 と、この内側に配置された環状の可撓性外歯歯車 3 2 と、この内側に嵌め込まれた波動発生器 3 3 とを有し、波動発生器 3 3 は可撓性外歯歯車 3 2 を半径方向に撓めて部分的に剛性内歯歯車 3 1 に噛み合わせると共に、噛み合わせ位置を円周方向に移動させることにより、剛性内歯歯車 3 1 と可撓性外歯歯車 3 2 との間に歯数差に応じた相対回転を発生させるようになっている。

40

【 0 0 4 3 】

剛性内歯歯車 3 1 は、一点鎖線で示す締結ボルト 4 1 によってフランジ 2 5 a に固定されている。

この内側に配置されているカップ形状の可撓性外歯歯車 3 2 は、円筒状の胴部 3 4 と、この胴部 3 4 の一端を封鎖している環状のダイヤフラム 3 5 と、胴部 3 4 の他方の開口端の外周面に形成された外歯 3 7 とを備えた構成となっている。この可撓性外歯歯車 3 2 は、玉軸受 3 6 により回転可能に支持され、後述する直動部側の部材である出力軸等に連結される。

【 0 0 4 4 】

波動発生器 3 3 は、モータ軸 4 2 に同軸状態に固定されている円筒状ハブ 3 9 と、この

50

円筒状ハブ 39 の外周面に同軸状態で取り付けられた楕円形輪郭のプラグ 38 と、このプラグ 38 の外周面に装着された玉軸受 44 とを備えている。玉軸受 44 の内外輪は可撓性のものであり、その外輪はプラグ 38 によって楕円形に撓められている。

【 0045 】

波動発生器 33 は、カップ形状の可撓性外歯歯車 32 における外歯 37 が形成されている円筒状の胴部 34 の開口端側の部位に嵌め込まれている。円筒状の胴部 34 の外歯 37 が形成されている部位は波動発生器 33 によって楕円形に撓められており、その楕円形の長軸方向の両端に位置する外歯 37 の部分が円環状の剛性内歯歯車 31 の内歯 40 の部分に噛み合っている。

【 0046 】

波動歯車装置 30 において、剛性内歯歯車 31 の歯数は可撓性外歯歯車 32 の歯数より $2n$ (n は正の整数) 枚だけ多く、通常は 2 枚だけ多い。モータ (図示せず) を駆動してモータ軸 42 を回転すると、波動歯車装置 30 の回転入力部材である波動発生器 33 が回転する。波動発生器 33 が回転すると、剛性内歯歯車 31、可撓性外歯歯車 32 の噛み合い位置が円周方向に移動し、両歯車間に相対回転が発生する。

本実施形態においては、剛性内歯歯車 31 が固定されているので、負荷側に連結されている減速回転出力部材である可撓性外歯歯車 32 が歯数差に応じた減速比で減速回転して負荷側の部材を回転駆動する。

【 0047 】

次に、直動部 50 は、作動軸である送りねじ 24 と、回転運動部から伝達される回転運動を直動運動に変換するためのナット 46 と、回り止め 49 と、スペーサ 43 とを含んで構成される。

【 0048 】

まず、スペーサ 43 は、可撓性外歯歯車 32 の胴部 34 のダイヤフラム 35 の前面側に固定されている。スペーサ 43 には、出力軸である送りねじ 24 と略同軸の孔が設けられており、進退動作する送りねじ 24 を収容できるよう構成されている。

なお、共振周波数調整装置は上記スペーサ 43 を有していなくてもよい。また、スペーサ 43 の幅 (厚み) は、送りねじ 24 の長さ、すなわち、必要とする前後動作のストロークに応じて定めればよい。

【 0049 】

スペーサ 43 の前面には、ナット 46 が、一点鎖線で示す締結ボルト 47 によって固定されている。波動歯車装置 30 の回転運動がスペーサ 43 を介してナット 46 に伝達されると、ナット 46 の回転が送りねじ 24 の進退動作 (直動) に変換される。

送りねじ 24 は、中心軸 48 に沿って前後に摺動する回り止め 49 により回転が抑制されているため、ナット 46 の回転により、中心軸 48 に沿って前後に移動 (進退動作) する。

【 0050 】

なお、上記直動アクチュエータ 23 においては、ナット 46 が可撓性外歯歯車 32 側に締結ボルトにより固定されているが、ナット 46 は、剛性内歯歯車 31 側に固定されていてもよい。その場合、可撓性外歯歯車 32 は、フランジ 25a に固定される。

【 0051 】

共振周波数調整装置 20 は、減速比を大きくしやすい波動歯車装置 30 を含む直動アクチュエータ 23 を有しているため、超伝導加速空洞 10 は、コンパクトな構造でもより大きな力を得ることができる。

【 0052 】

図 2 に戻り、フランジ 25a には、直動アクチュエータ 23 が基体 28 と接触しないように固定されている。超伝導加速空洞 10 は、低温流体によって常に冷却されており、直動アクチュエータ 23 を基体 28 から張り出したフランジ 25a に、基体 28 と非接触の状態に固定することで、直動アクチュエータ 23 から基体 28 への熱の移動を抑制することができる。

10

20

30

40

50

共振周波数調整装置 20 は、上述の通り真空容器内に収容されて使用されるために、直動アクチュエータ 23 と基体 28 とを接触しないようにすることで、熱の移動を効果的に抑制することができる。

【0053】

また、すでに説明したとおり、共振周波数調整装置 20 において、直動アクチュエータ 23 は、フランジ 25 a に固定されているが、直動アクチュエータ 23 の固定位置は上記に制限されず、フランジ 25 b に固定されていてもよい。この場合、送りねじ 24 によって、フランジ 25 a が押される形態となる。また、容器 21 におけるペローズ 22 についても、基体 28 の側面の任意の箇所に設けることができる。

【0054】

また、容器 21 は、伸縮部（1つ又は複数のペローズ 22 等からなる）を複数有していてもよい。容器 21 が伸縮部を複数有する場合、一对のフランジ 25、及び、直動アクチュエータ 23 は、各伸縮部にそれぞれ配置されていてもよい。

【0055】

図 2 において、容器 21 は、直動アクチュエータ 23 と 180 度回転対称（2 回対称、（360 / 2）度対称）の位置に、ガイド機構を有する。ガイド機構は、一对のフランジ 25 によって前後に摺動可能に支持されたガイド軸 26 を含んで構成される。

【0056】

具体的には、一对のフランジ 25 は、ペローズ 22 の伸縮動作をガイドするガイド軸 26 を受け入れ可能な貫通孔を有しており、ガイド軸 26 をその貫通孔で支持し、容器 21 の長手方向に摺動可能にしている。このガイド軸 26 の長軸は、容器 21 の長手方向と略同一となるように配置されている。

なお、共振周波数調整装置 20 において、ガイド軸 26 は一对のフランジ 25 のいずれにも固定されていないが、ガイド機構の形態としては、ガイド軸 26 が容器 21 の軸方向に沿って摺動できれば、上記に制限されず、ガイド軸 26 が一对のフランジ 25 のいずれか一方（フランジ 25 a 又は 25 b）に固定されていてもよい。

【0057】

図 2 において、共振周波数調整装置 20 は、ガイド機構を 1 つ有しているが、本発明の共振周波数調整装置は、ガイド機構を 2 個以上有していてもよい。その場合、1 つ又は複数の直動アクチュエータ、及び、複数のガイド機構のそれぞれが、略回転対称の位置に配置されていることが好ましい。例えば、直動アクチュエータと、ガイド機構との合計として 4 つ配置されている場合、これらの配置位置は、4 回対称（360 / 4 度対称）であることが好ましい。

【0058】

なお、図 2 において、共振周波数調整装置 20 は、円筒状の容器 21 を有しているが、すでに説明したとおり、共振周波数調整装置 20 が有する容器の形状は円筒状に制限されない。例えば、共振周波数調整装置 20 が角筒状の容器を有している場合、1 つ又は複数の直動アクチュエータと、1 つ又は複数のガイド機構との配置は、上記と同様、略回転対称であることが好ましい。この点では、容器 21 も長手方向の中心軸に対して略回転対称であることが好ましい。

【0059】

また、共振周波数調整装置 20 が複数の直動アクチュエータを有する場合、それぞれが独立して変位を調整してもよいし、同期して変位を調整してもよい。なかでも、より安定的に変位を調整できる観点では、同期して変位を調整することが好ましい。

【0060】

共振周波数調整装置 20 は、上記ガイド機構を有しているため、直動アクチュエータ 23 の駆動による容器 21 のゆがみが抑制され、スムーズに伸長することができる。

【0061】

共振周波数調整装置 20 は、簡易な構造であるため、故障も少なく、極低温、真空下という特殊な環境下でも安定した動作を実現できる。また、波動歯車装置を用いた直動アク

10

20

30

40

50

チュエータを有するため、小型でもより大きな力を得ることができ、超伝導加速空洞 10 の「粗動」にも対応できる。また、小型、かつ、部品配置の自由度が高いため、小型の加速器用にもより導入しやすい。

【 0 0 6 2 】

[第 2 実施形態]

図 4 は、本発明の第 2 実施形態に係る共振周波数調整装置の説明図である。共振周波数調整装置 60 は、第 1 実施形態に係る共振周波数調整装置 20 が有するガイド機構に代えて、2 つ目の直動アクチュエータ 61 を有する。なお、直動アクチュエータ 61 (及び、送りねじ 62) については、直動アクチュエータ 23 (及び、送りねじ 24) と同様の形態が挙げられ、好適形態も同様であるため、説明を省略する。

10

【 0 0 6 3 】

本実施形態に係る共振周波数調整装置 60 は容器 21 の中心軸に対して回転対称な位置に 2 つの直動アクチュエータ 23、61 を有するため、より安定的に、容器 21 (及び、超伝導加速空洞 10) を伸縮させることができる。

【 0 0 6 4 】

なお、共振周波数調整装置 60 は、直動アクチュエータを 2 つ有しているが、本発明の実施形態に係る共振周波数調整装置としては上記に制限されず、直動アクチュエータを 3 つ以上有していてもよい。なお、直動アクチュエータを n 個有する場合、その配置は、容器 21 の中心軸に対して、(360 / n) 度対称の位置にそれぞれ配置されることが好ましい。

20

【 0 0 6 5 】

また、共振周波数調整装置 60 においては、いずれもフランジ 25 a に直動アクチュエータ 23、及び、63 がそれぞれ配置されている。しかし、本発明の実施形態に係る共振周波数調整装置における、複数の直動アクチュエータの配置は上記に制限されず、容器 21 の中心軸に沿って互い違いに配置されていてもよい。すなわち、フランジ 25 a とフランジ 25 b とに直動アクチュエータ 23 と、直動アクチュエータ 61 とがそれぞれ配置されていてもよく、クライオモジュール組み立てに際してのレイアウト制限等に応じて適宜調整できる。

【 0 0 6 6 】

なお、共振周波数調整装置 60 は、直動アクチュエータ 23、及び、60 を有しているが、3 つ以上の直動アクチュエータを有していてもよい。これらの直動アクチュエータは、それぞれが独立して変位を調整してもよいし、同期して変位を調整してもよい。なかでも、より安定的に変位を調整できる観点では、同期して変位を調整することが好ましい。

30

【 0 0 6 7 】

[第 3 実施形態]

図 5 は、本発明の第 3 実施形態に係る共振周波数調整装置の説明図である。共振周波数調整装置 70 は、第 1 実施形態に係る共振周波数調整装置 20 において、直動アクチュエータがフランジに直接固定されていたところ、それらの間に断熱材 71 が配置されている点が異なる。

【 0 0 6 8 】

すでに説明したとおり、共振周波数調整装置 70 は、図示しない真空容器内に収容されて、全体としてクライオモジュールと呼ばれる一体の装置を構成する。したがって、稼働時には、共振周波数調整装置 70 の周囲は真空・極低温状態である。

40

【 0 0 6 9 】

共振周波数調整装置 70 は、直動アクチュエータ 23 とフランジ 25 a との間に断熱材 71 を配置して、それらの間の熱の移動を制限することで、直動アクチュエータ 23 から発生する熱による、超伝導加速空洞 10 の温度調整に与える影響をより小さくすることができる。

【 0 0 7 0 】

断熱材 71 は、フランジと直動アクチュエータ 23 との間に配置されていればよく、例

50

えば、直動アクチュエータ 2 3 のモータのハウジングと、フランジとの間に配置されていてもよい。

なお、断熱材 7 1 の材質としては、極低温環境において使用できるものであれば特に制限されず、ポリウレタンフォーム、ポリ塩化ビニルフォーム、及び、発泡ポリイミド等、並びに、ガラスエポキシ等の公知の材料が使用できる。

【 0 0 7 1 】

図 6 は、本実施形態に係る共振周波数調整装置の変形例の説明図である。共振周波数調整装置 8 0 は、上記第 3 実施形態に係る共振周波数調整装置 7 0 と比較して、自身（共振周波数調整装置 8 0 ）が収容される筒状の真空容器 8 2 と直動アクチュエータとの間を熱的に接触させるための、熱伝導部材 8 1 を更に有する点が異なる。

10

【 0 0 7 2 】

共振周波数調整装置 8 0 は、筒状の真空容器 8 2 に収容され、低温流体の導入用の導入管 8 3 と、低温流体の排出管 8 4（排気管）とを有している。また、共振周波数調整装置 8 0 は、熱伝導部材 8 1 を有する。熱伝導部材 8 1 は、リボン状の部材であり、真空容器 8 2 と直動アクチュエータ 2 3 とが熱的に接触するように配置されている。共振周波数調整装置 8 0 は、熱伝導部材 8 1 を有するため、真空下においても十分に放熱が可能であり、より安定的に動作可能である。

【 0 0 7 3 】

熱伝導部材 8 1 の材質としては特に制限されないが、一形態として金属が好ましい。金属としては、例えば、銅、及び、アルミニウム等が挙げられる。極低温領域における熱伝導率がより高くなりやすい観点では、高純度の金属を用いることが好ましく、一形態として、残留抵抗比（RRR）が 1 0 0 以上であることが好ましい。

20

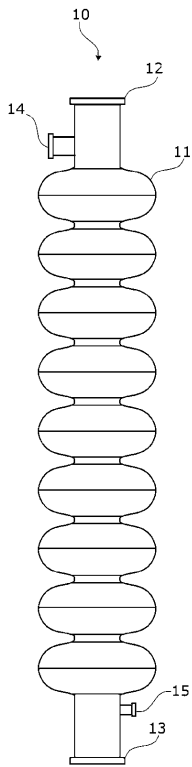
【符号の説明】

【 0 0 7 4 】

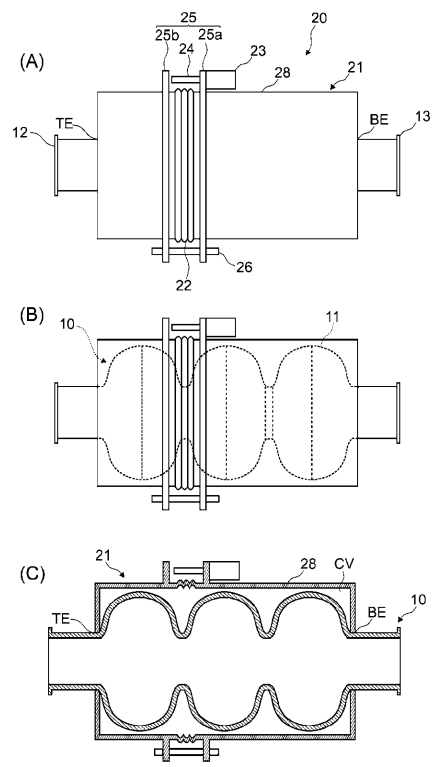
1 0 : 超伝導加速空洞、1 1 : セル、1 2、1 3 : ポート、1 4、1 5 : カブラ、2 0 : 共振周波数調整装置、2 1 : 容器、2 2 : ペローズ、2 3 : 直動アクチュエータ、2 4 : 送りねじ、2 5 : 一对のフランジ、2 5 a、2 5 b : フランジ、2 6 : ガイド軸、2 8 : 基体、3 0 : 波動歯車装置、3 1 : 剛性内歯歯車、3 2 : 可撓性外歯歯車、3 3 : 波動発生器、3 4 : 胴部、3 5 : ダイヤフラム、3 6 : 玉軸受、3 7 : 外歯、3 8 : プラグ、3 9 : 円筒状ハブ、4 0 : 内歯、4 1 : 締結ボルト、4 2 : モータ軸、4 3 : スペーサ、4 4 : 玉軸受、4 6 : ナット、4 7 : 締結ボルト、4 8 : 中心軸、4 9 : 回り止め、5 0 : 直動部、6 0 : 共振周波数調整装置、6 1 : 直動アクチュエータ、6 2 : 送りねじ、7 0 : 共振周波数調整装置、7 1 : 断熱材、8 0 : 共振周波数調整装置、8 1 : 熱伝導部材、8 2 : 真空容器、8 3 : 導入管、8 4 : 排出管

30

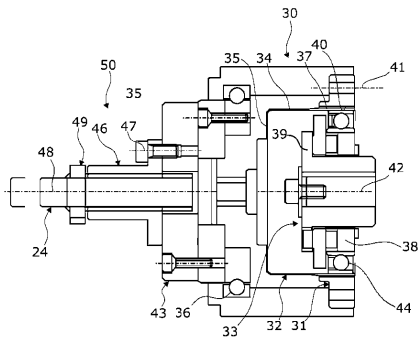
【 図 1 】



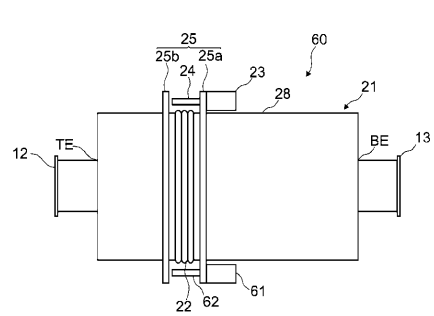
【 図 2 】



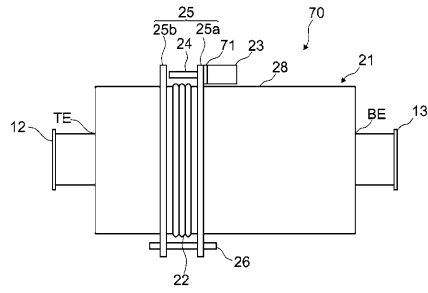
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】

