

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6580501号
(P6580501)

(45) 発行日 令和1年9月25日(2019.9.25)

(24) 登録日 令和1年9月6日(2019.9.6)

(51) Int. Cl.		F I	
HO 1 F	6/02	(2006.01)	HO 1 F 6/02
HO 1 F	6/00	(2006.01)	HO 1 F 6/00 1 8 0
HO 5 H	13/00	(2006.01)	HO 5 H 13/00

請求項の数 5 (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2016-44132 (P2016-44132)	(73) 特許権者	000002107
(22) 出願日	平成28年3月8日 (2016.3.8)		住友重機械工業株式会社
(65) 公開番号	特開2017-162896 (P2017-162896A)		東京都品川区大崎二丁目1番1号
(43) 公開日	平成29年9月14日 (2017.9.14)	(74) 代理人	100088155
審査請求日	平成30年6月12日 (2018.6.12)		弁理士 長谷川 芳樹
		(74) 代理人	100113435
			弁理士 黒木 義樹
		(74) 代理人	100162640
			弁理士 柳 康樹
		(72) 発明者	三上 行雄
			神奈川県横須賀市夏島町19番地 住友重 機械工業株式会社 横須賀製造所内
		審査官	鈴木 孝章

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超伝導サイクロトロン及び超伝導電磁石

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

一対の磁極と、

前記一対の磁極の間に配置され、荷電粒子を加速させるための電場を発生させる加速電極と、

前記一対の磁極のそれぞれを囲むように設けられた第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルを有するコイル部と、

前記コイル部に電力を供給する電力供給部と、を備え、

前記第1超伝導コイル及び前記第2超伝導コイルは直列に接続され、

前記電力供給部は、

正側が前記コイル部の一端側に接続されていると共に負側が前記コイル部の他端側に接続されている第1電源と、

正側が前記第2超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が前記第2超伝導コイルの他端側に接続されている第2電源と、

前記第1電源の前記正側と前記コイル部の前記一端側との間に設けられた第1分岐点から、前記第1電源の前記負側と前記コイル部の前記他端側との間に設けられた第2分岐点までを接続し、且つ、前記第1分岐点及び前記第2分岐点でのみ接続されるように、前記第1電源に対して前記コイル部と並列に接続された抵抗と、

前記第1電源の前記正側と前記第1分岐点との間、又は、前記第1電源の前記負側と前記第2分岐点との間に配置され、前記第1電源を流れる電流を遮断可能な遮断器と、を

有する、超伝導サイクロトロン。

【請求項 2】

前記コイル部は、前記コイル部においてクエンチが発生したことを検知するクエンチ検出部を備え、

前記電力供給部は、前記クエンチ検出部が前記コイル部においてクエンチが発生したことを検知した場合に、前記第 1 電源を流れる電流を遮断するように前記遮断器を動作させる制御部を備える、請求項 1 記載の超伝導サイクロトロン。

【請求項 3】

前記コイル部は、前記一対の磁極をそれぞれ囲むように設けられた第 3 超伝導コイル及び第 4 超伝導コイルを更に有し、

前記第 1 超伝導コイル、前記第 2 超伝導コイル、前記第 3 超伝導コイル及び前記第 4 超伝導コイルは直列に接続され、

前記電力供給部は、

正側が前記第 3 超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が前記第 3 超伝導コイルの他端側に接続されている第 3 電源と、

正側が前記第 4 超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が前記第 4 超伝導コイルの他端側に接続されている第 4 電源と、を有する、請求項 1 又は 2 記載の超伝導サイクロトロン。

【請求項 4】

前記コイル部は、前記第 3 超伝導コイル及び前記第 4 超伝導コイルからなる対を複数有する、請求項 3 記載の超伝導サイクロトロン。

【請求項 5】

一対の磁極と、

前記一対の磁極のそれぞれを囲むように設けられた第 1 超伝導コイル及び第 2 超伝導コイルを有するコイル部と、

前記コイル部に電力を供給する電力供給部と、を備え、

前記第 1 超伝導コイル及び前記第 2 超伝導コイルは直列に接続され、

前記電力供給部は、

正側が前記コイル部の一端側に接続されていると共に負側が前記コイル部の他端側に接続されている第 1 電源と、

正側が前記第 2 超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が前記第 2 超伝導コイルの他端側に接続されている第 2 電源と、

前記第 1 電源の前記正側と前記コイル部の前記一端側との間に設けられた第 1 分岐点から、前記第 1 電源の前記負側と前記コイル部の前記他端側との間に設けられた第 2 分岐点までを接続し、且つ、前記第 1 分岐点及び前記第 2 分岐点でのみ接続されるように、前記第 1 電源に対して前記コイル部と並列に接続された抵抗と、

前記第 1 電源の前記正側と前記第 1 分岐点との間、又は、前記第 1 電源の前記負側と前記第 2 分岐点との間に配置され、前記第 1 電源を流れる電流を遮断可能な遮断器と、を有する、超伝導電磁石。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、超伝導サイクロトロン及び超伝導電磁石に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、一対の磁極と、一対の磁極のそれぞれを囲むように設けられた一対の超伝導コイルを有するコイル部と、コイル部に電力を供給する電力供給部と、を備える超伝導電磁石を用いた超伝導サイクロトロンが知られている（例えば特許文献 1）。

【0003】

このような超伝導サイクロトロンでは、各超伝導コイルとサイクロトロンを構成する鉄

10

20

30

40

50

製部材等との間に強い磁気力が働く場合がある。そこで、このような強い力が各超伝導コイルに働くことにより超伝導コイルがダメージを受けることを抑制するため、超伝導コイル同士を互いに連結して、各超伝導コイルに働く力を相殺することが行われている。

【0004】

ここで、コイル部においてクエンチが発生すると、各超伝導コイルに働く力のバランスが崩れて力が相殺されなくなり、各超伝導コイルに働く強い力によって超伝導コイルがダメージを受ける虞がある。このため、クエンチが発生した場合には、各超伝導コイルに働く磁気力を速やかに低減させることが望まれる。そこで、電力供給部に、各超伝導コイルを流れる電流を速やかに減衰させるための抵抗を備えた保護回路を設けることが知られている。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2014-241217号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、このような超伝導サイクロトロンでは、一对の磁極の間に形成される磁場の強さ及び向きを精度良く調整するため、各超伝導コイルに流される電流の大きさは超伝導コイル毎に個別に制御される。このため、コイル部においてクエンチが発生した場合であっても、各超伝導コイルを流れる電流を一律に減衰させることができない。このような理由から、保護回路は各超伝導コイルに対して個別に設けられているため、クエンチが発生すると各超伝導コイルに流れる電流の大きさに差が生じる。従って、保護回路の抵抗によって電流が十分に減衰するまでの時間にも超伝導コイル毎に差が生じることとなり、各超伝導コイルに働く力を十分に抑制することができない虞がある。

20

【0007】

本発明は、上記課題を解決するためになされたものであり、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を抑制することができる超伝導サイクロトロン及び超伝導電磁石を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

30

【0008】

本発明の超伝導サイクロトロンは、一对の磁極と、一对の磁極の間に配置され、荷電粒子を加速させるための電場を発生させる加速電極と、一对の磁極のそれぞれを囲むように設けられた第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルを有するコイル部と、コイル部に電力を供給する電力供給部と、を備え、第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルは直列に接続され、電力供給部は、正側がコイル部の一端側に接続されていると共に負側がコイル部の他端側に接続されている第1電源と、正側が第2超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が第2超伝導コイルの他端側に接続されている第2電源と、第1電源の正側とコイル部の一端側との間に設けられた第1分岐点から、第1電源の負側とコイル部の他端側との間に設けられた第2分岐点までを接続するように、第1電源に対してコイル部と並列に接続された抵抗と、第1電源の正側と第1分岐点との間、又は、第1電源の負側と第2分岐点との間に配置され、第1電源を流れる電流を遮断可能な遮断器と、を有する。

40

【0009】

この超伝導サイクロトロンでは、第1電源によって第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルに電力が供給されると共に、第2電源によって第2超伝導コイルに電力が供給される。従って、各超伝導コイルに流される電流の大きさを超伝導コイル毎に個別に制御することが可能となり、一对の磁極の間に形成される磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。また、コイル部においてクエンチが発生した場合には、遮断器を動作させることによって、抵抗、第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルが互いに直列に接続された閉回路が形成される。従って、コイル部の各超伝導コイルを流れていた電流は、抵抗を介

50

する閉回路を流れることとなるため、各超伝導コイルを流れる電流は一律に減衰する。以上により、各超伝導コイルにおいて、保護回路の抵抗によって電流が十分に減衰するまでの時間に差が生じないため、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を抑制することができる。

【0010】

本発明の超伝導サイクロトロンでは、コイル部は、コイル部においてクエンチが発生したことを検知するクエンチ検出部を備え、電力供給部は、クエンチ検出部がコイル部においてクエンチが発生したことを検知した場合に、第1電源を流れる電流を遮断するように遮断器を動作させる制御部を備えてもよい。この場合、コイル部においてクエンチが発生した場合に、速やかに第1電源を流れる電流を遮断することができる。従って、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を速やかに抑制することができる。

10

【0011】

本発明の超伝導サイクロトロンでは、コイル部は、一对の磁極をそれぞれ囲むように設けられた第3超伝導コイル及び第4超伝導コイルを更に有し、第1超伝導コイル、第2超伝導コイル、第3超伝導コイル及び第4超伝導コイルは直列に接続され、電力供給部は、正側が第3超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が第3超伝導コイルの他端側に接続されている第3電源と、正側が第4超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が第4超伝導コイルの他端側に接続されている第4電源と、を有してもよい。この場合、一对の磁極の間に生じる磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。

20

【0012】

本発明の超伝導サイクロトロンでは、コイル部は、第3超伝導コイル及び第4超伝導コイルからなる対を複数有してもよい。この場合、一对の磁極の間に生じる磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。

【0013】

本発明の超伝導電磁石は、一对の磁極と、一对の磁極のそれぞれを囲むように設けられた第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルを有するコイル部と、コイル部に電力を供給する電力供給部と、を備え、第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルは直列に接続され、電力供給部は、正側がコイル部の一端側に接続されていると共に負側がコイル部の他端側に接続されている第1電源と、正側が第2超伝導コイルの一端側に接続されていると共に負側が第2超伝導コイルの他端側に接続されている第2電源と、第1電源の正側とコイル部の一端側との間に設けられた第1分岐点から、第1電源の負側とコイル部の他端側との間に設けられた第2分岐点までを接続するように、第1電源に対してコイル部と並列に接続された抵抗と、第1電源の正側と第1分岐点との間、又は、第1電源の負側と第2分岐点との間に配置され、第1電源を流れる電流を遮断可能な遮断器と、を有してもよい。

30

【0014】

この超伝導電磁石では、第1電源によって第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルに電力が供給されると共に、第2電源によって第2超伝導コイルに電力が供給される。従って、各超伝導コイルに流される電流の大きさを超伝導コイル毎に個別に制御することが可能となり、一对の磁極の間に形成される磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。また、コイル部においてクエンチが発生した場合に、遮断器を動作させることによって、抵抗、第1超伝導コイル及び第2超伝導コイルが互いに直列に接続された閉回路が形成される。従って、コイル部の各超伝導コイルを流れていた電流は、抵抗を介する閉回路を流れることとなるため、各超伝導コイルを流れる電流は一律に減衰する。以上により、各超伝導コイルにおいて、保護回路の抵抗によって電流が十分に減衰するまでの時間に差が生じないため、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を抑制することができる。

40

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を抑制することが可能となる。

50

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】実施形態に係る超伝導サイクロトロン1の構成を示す断面図である。

【図2】実施形態に係る超伝導サイクロトロン1の回路図である。

【図3】変形例に係る超伝導サイクロトロン1の回路図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明の好適な実施形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、各図において同一部分又は相当部分には同一の符号を付し、重複する説明は省略する。

【0018】

図1に示されるように、本実施形態に係る超伝導サイクロトロン1は、イオン源（不図示）から荷電粒子を加速空間G内に供給し、加速空間G内の荷電粒子を加速して荷電粒子ビームを出力する横置き型の円形加速器である。荷電粒子としては、例えば陽子、重粒子（重イオン）などが挙げられる。超伝導サイクロトロン1は、例えば荷電粒子線治療用の加速器として用いられる。

【0019】

この超伝導サイクロトロン1では、加速空間G内で円軌道を描く荷電粒子ビームを継続的に加速するため、等時性（円軌道の半径の大きさに関係なく一周にかかる時間が等しいこと）を確保するように磁場の強さ及び向きを制御する必要がある。

【0020】

超伝導サイクロトロン1は、イオン源の他に、超伝導電磁石5、ディ電極（加速電極）2及び上下方向荷重支持体11、12を備えている。超伝導電磁石5は、一对の磁極3、4と、ヨーク6と、コイル部7と、コイル支持枠9と、真空容器10と、電力供給部20と、を有する。コイル部7は、第1超伝導コイル7A、第2超伝導コイル7B、及びクエンチ検出部8を有する（図2参照）。

【0021】

磁極3、4は、第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bの中心軸線C方向に離間して配置されている。なお、超伝導サイクロトロン1では、中心軸線C方向は、上下方向に沿って配置されている。磁極3は、加速空間Gより上方に配置された上磁極であり、磁極4は、加速空間Gより下方に配置された下磁極である。また、磁極3、4の間には、ディ電極2が配置されている。ディ電極2は、高周波を付与されることで、荷電粒子を加速させるための電場を発生させる。

【0022】

ヨーク6は、中空の円盤型のブロックであり、その内部に磁極3、4及び真空容器10が配置されている。ヨーク6は、円筒部6aと、円筒部6aの一方の開口を閉じるように形成された天部6bと、円筒部6aの他方の開口を閉じるように形成された底部6cと、を備える。ヨーク6は、第1超伝導コイル7A、第2超伝導コイル7B、及び磁極3、4で生成した磁場が外部に漏れないようにするためのものである。

【0023】

第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bは、一对の磁極3、4のそれぞれを囲むように設けられている。第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bは、中心軸線C方向に並んで配置されている。第1超伝導コイル7Aは、磁極3の外周を覆うように巻かれ、第2超伝導コイル7Bは、磁極4の外周を覆うように巻かれている。第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bは、例えば、内周側に内枠（または内巻枠）が設けられておらず、コイル（線材及び線材を固着する接着材）の内周面が他の部材によって接着・固定されていない空芯コイルである。

【0024】

第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bは、冷凍機（不図示）によって冷却されて超伝導状態とされると共に、後述する電力供給部20によって電力を供給される。第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bは、直列に接続されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 5 】

図 2 に示されるクエンチ検出部 8 は、コイル部 7 において超伝導コイルにクエンチが発生したことを検知する。クエンチ検出部 8 は、第 1 超伝導コイル 7 A におけるクエンチの発生を検知する第 1 クエンチ検出器 8 A と、第 2 超伝導コイル 7 B におけるクエンチの発生を検知する第 2 クエンチ検出器 8 B と、第 1 クエンチ検出器 8 A 及び第 2 クエンチ検出器 8 B の動作を制御するクエンチ検出器制御装置 8 M と、を含む。第 1 クエンチ検出器 8 A 及び第 2 クエンチ検出器 8 B は同様の構成を備えるため、以下では第 1 クエンチ検出器 8 A の構成について説明する。

【 0 0 2 6 】

第 1 クエンチ検出器 8 A は、第 1 超伝導コイル 7 A を一端側と他端側との二つの領域に分割し、各領域の電圧を測定する。第 1 クエンチ検出器 8 A は、クエンチが発生していない状態での各領域の電圧が略同等となる位置にて第 1 超伝導コイル 7 A を分割し、各領域の電圧差の変化を監視する。第 1 超伝導コイル 7 A においてクエンチが発生すると、クエンチが発生した部位における抵抗値が増大する。このため、第 1 クエンチ検出器 8 A は、監視している電圧差に所定値以上の変化が生じた場合に、第 1 超伝導コイル 7 A においてクエンチが発生したことを検知する。

【 0 0 2 7 】

クエンチ検出器制御装置 8 M は、第 1 クエンチ検出器 8 A 又は第 2 クエンチ検出器 8 B がクエンチの発生を検知した場合には、コイル部 7 においてクエンチが発生したことを電力供給部 2 0 の制御部 2 5 に対して通知する。制御部 2 5 について、詳しくは後述する。

【 0 0 2 8 】

図 1 に戻り、コイル支持枠 9 は、第 1 超伝導コイル 7 A の外周面を覆う側板部 9 a と、第 1 超伝導コイル 7 A の上面を覆う上リング部材 9 b と、第 2 超伝導コイル 7 B の外周面を覆う側板部 9 c と、第 2 超伝導コイル 7 B の下面を覆う下リング部材 9 d と、上下の側板部 9 a , 9 c を連結する中間部 9 e と、を備える。コイル支持枠 9 は、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B の周方向において全周に亘って形成されている。

【 0 0 2 9 】

上リング部材 9 b は、側板部 9 a の上端部から径方向内側に張り出すように形成されている。上リング部材 9 b は、円環板状を呈し、上リング部材 9 b の板厚方向は、中心軸線 C 方向に沿うように配置されている。

【 0 0 3 0 】

下リング部材 9 d は、側板部 9 c の下端部から径方向内側に張り出すように形成されている。下リング部材 9 d は、円環板状を呈し、下リング部材 9 d の板厚方向は、中心軸線 C 方向に沿うように配置されている。

【 0 0 3 1 】

中間部 9 e の径方向の幅は、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B の径方向の幅に対応している。中間部 9 e の断面は、例えば矩形を呈している。中間部 9 e の上面は、第 1 超伝導コイル 7 A の下面に当接し、中間部 9 e の下面は、第 2 超伝導コイル 7 B の上面に当接している。また、中間部 9 e の上面は、側板部 9 a に接合され、中間部 9 e の下面は、側板部 9 c に接合されている。中間部 9 e と側板部 9 a との接合は、ボルト接合でもよく、溶接などその他の接合方法でもよい。同様に、中間部 9 e と側板部 9 c との接合は、ボルト接合でもよく、溶接などその他の接合方法でもよい。

【 0 0 3 2 】

このような構成により、中間部 9 e は、第 1 超伝導コイルと第 2 超伝導コイルとを互いに連結する。これにより、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B のそれぞれと、例えば鉄製のヨーク 6 等との間に働く強力な磁気力が相殺される。

【 0 0 3 3 】

真空容器 1 0 は、第 1 超伝導コイル 7 A、第 2 超伝導コイル 7 B、及びコイル支持枠 9 を収容している。真空容器 1 0 には、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B を冷却するための冷凍機が接続されている。冷凍機は、例えば、GM 冷凍機 (Gifford-McMa

10

20

30

40

50

hon cooler) であり、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B を例えば 4 K に冷却することができる。なお、冷凍機は、GM 冷凍機に限定されず、例えばスターリング冷凍機を始めその他の冷凍機でもよい。

【 0 0 3 4 】

上下方向荷重支持体 1 1 , 1 2 は、コイル支持枠 9 を支持すると共にコイル支持枠 9 の中心軸線 C 方向の位置を調整する。上下方向荷重支持体 1 1 、 1 2 は、ヨーク 6 に対して相対的に固定され、中心軸線 C 方向からコイル支持枠 9 を支持するものである。上下方向荷重支持体 1 1 , 1 2 は、上下一対としてコイル支持枠 9 を挟むように配置され、互いに反対方向にコイル支持枠 9 を引っ張ることでコイル支持枠 9 を支持している。上下方向荷重支持体 1 1 , 1 2 は、コイル支持枠 9 の周方向において、複数配置されている。複数の上下方向荷重支持体 1 1 , 1 2 は、コイル支持枠 9 の周方向において、等間隔で配置されている。

10

【 0 0 3 5 】

図 2 に示されるように、電力供給部 2 0 は、コイル部 7 に電力を供給する。電力供給部 2 0 は、第 1 電源 2 1 A と、第 2 電源 2 1 B と、保護抵抗 (抵抗) 2 3 と、遮断器 2 4 と、制御部 2 5 と、を含む。

【 0 0 3 6 】

第 1 電源 2 1 A は、コイル部 7 の全体に対して電力を供給するための電源である。第 1 電源 2 1 A は、正側 P 1 がコイル部 7 の一端側 S 1 に接続されていると共に負側 N 1 がコイル部 7 の他端側 S 2 に接続されている。コイル部 7 の一端側 S 1 及び他端側 S 2 とは、直列に接続された複数の超伝導コイル (ここでは第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B の 2 つの超伝導コイル) を含むコイル部 7 の両端側である。

20

【 0 0 3 7 】

第 2 電源 2 1 B は、コイル部 7 の内の第 2 超伝導コイル 7 B に対して電力を供給するための電源である。第 2 電源 2 1 B は、正側 P 2 が第 2 超伝導コイル 7 B の一端側 S 3 に接続されていると共に負側 N 2 が第 2 超伝導コイル 7 B の他端側 S 4 に接続されている。第 2 超伝導コイル 7 B の一端側 S 3 及び他端側 S 4 とは、第 2 超伝導コイル 7 B の両端側である。

【 0 0 3 8 】

保護抵抗 2 3 は、コイル部 7 を流れる電流を減衰させるための抵抗である。保護抵抗 2 3 は、第 1 電源 2 1 A に対してコイル部 7 と並列に接続されている。具体的に、第 1 電源 2 1 A の正側 P 1 とコイル部 7 の一端側 S 1 とを接続する回路上には、当該回路から別の回路を分岐させる第 1 分岐点 2 2 A が設けられている。また、第 1 電源 2 1 A の負側 N 1 とコイル部 7 の他端側 S 2 とを接続する回路上には、当該回路から別の回路を分岐させる第 2 分岐点 2 2 B が設けられている。第 1 分岐点 2 2 A から分岐する回路と、第 2 分岐点 2 2 B から分岐する回路とは、保護抵抗 2 3 を介して接続されている。すなわち、保護抵抗 2 3 は、第 1 分岐点 2 2 A から第 2 分岐点 2 2 B までを接続するように、第 1 電源 2 1 A に対してコイル部 7 と並列に接続されている。

30

【 0 0 3 9 】

遮断器 2 4 は、第 1 電源 2 1 A を流れる電流を遮断するための遮断器である。遮断器 2 4 は、後述する制御部 2 5 からの指令により遮断 / 接続の動作を実行する。遮断器 2 4 は、第 1 電源 2 1 A の正側 P 1 と第 1 分岐点 2 2 A との間に配置されている。このような位置に遮断器 2 4 が配置されることにより、遮断器 2 4 が第 1 電源 2 1 A を流れる電流を遮断すると、保護抵抗 2 3 、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B が互いに直列に接続された閉回路が形成される。なお、遮断器 2 4 は、第 1 電源 2 1 A の負側 N 1 と第 2 分岐点 2 2 B との間に配置されていてもよい。

40

【 0 0 4 0 】

制御部 2 5 は、電力供給部 2 0 の動作を制御する。特に、クエンチ検出器制御装置 8 M が第 1 クエンチ検出器 8 A 又は第 2 クエンチ検出器 8 B がクエンチの発生を検知した場合に、クエンチが発生したことをクエンチ検出器制御装置 8 M から通知されたときには、制

50

御部 2 5 は、第 1 電源 2 1 A を流れる電流を遮断するように遮断器 2 4 を動作させる。

【 0 0 4 1 】

次に、超伝導サイクロトロン 1 の動作について説明する。

【 0 0 4 2 】

超伝導サイクロトロン 1 において、まず、第 1 電源 2 1 A が第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B に対して電力を供給する。また、第 2 電源 2 1 B が第 2 超伝導コイル 7 B に対して電力を供給する。これにより、第 1 超伝導コイル 7 A と第 2 超伝導コイル 7 B とに対して互いに異なる大きさの電流を流すことができるため、一对の磁極 3 , 4 の間に形成される磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。

【 0 0 4 3 】

第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B に電流が流れて磁場が形成されると、各超伝導コイルとヨーク 6 等の鉄製部材等との間に強い磁気力が働く。このとき、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B はコイル支持枠 9 の中間部 9 e を介して互いに接続されており、且つ、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B のそれぞれに対してバランス良く（すなわち、中心軸線 C に垂直な平面に対して略面对称に）磁気力が働くため、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B のそれぞれに対して働く磁気力は相殺する。

【 0 0 4 4 】

ここで、コイル部 7 においてクエンチが発生すると、クエンチが発生した超伝導コイルの抵抗値が大きくなるため、クエンチが発生すると各超伝導コイルに流れる電流の大きさに差が生じる。このため、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B のそれぞれに対して働く磁気力が相殺しなくなる。

【 0 0 4 5 】

超伝導サイクロトロン 1 では、コイル部 7 においてクエンチが発生した場合には、クエンチが発生したことをクエンチ検出部 8 が検知する。そして、制御部 2 5 が、遮断器 2 4 に対して、電流を遮断する動作を実行するように指令を出す。

【 0 0 4 6 】

遮断器 2 4 が動作して第 1 電源 2 1 A を流れる電流が遮断されることによって、保護抵抗 2 3、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B が互いに直列に接続された閉回路が形成される。従って、コイル部 7 の各超伝導コイルを流れていた電流は、抵抗を介する閉回路を流れることとなるため、各超伝導コイルを流れる電流は一律に減衰する。

【 0 0 4 7 】

以上説明したように、超伝導サイクロトロン 1 では、第 1 電源 2 1 A によって第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B に電力が供給されると共に、第 2 電源 2 1 B によって第 2 超伝導コイル 7 B に電力が供給される。従って、各超伝導コイルに流される電流の大きさを超伝導コイル毎に個別に制御することが可能となり、一对の磁極 3 , 4 の間に形成される磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。また、コイル部 7 においてクエンチが発生した場合には、遮断器 2 4 を動作させることによって、保護抵抗 2 3、第 1 超伝導コイル 7 A 及び第 2 超伝導コイル 7 B が互いに直列に接続された閉回路が形成される。従って、コイル部 7 の各超伝導コイルを流れていた電流は、保護抵抗 2 3 を介する閉回路を流れることとなるため、各超伝導コイルを流れる電流は一律に減衰する。以上により、各超伝導コイルにおいて、保護回路の抵抗によって電流が十分に減衰するまでの時間に差が生じないため、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を抑制することができる。

【 0 0 4 8 】

超伝導サイクロトロン 1 では、コイル部 7 は、コイル部 7 においてクエンチが発生したことを検知するクエンチ検出部 8 を備え、電力供給部 2 0 は、クエンチ検出部 8 がコイル部 7 においてクエンチが発生したことを検知した場合に、第 1 電源 2 1 A を流れる電流を遮断するように遮断器 2 4 を動作させる制御部 2 5 を備える。このため、コイル部 7 においてクエンチが発生した場合に、速やかに第 1 電源 2 1 A を流れる電流を遮断することが

10

20

30

40

50

できる。従って、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を速やかに抑制することができる。

【0049】

また、超伝導電磁石5では、第1電源21Aによって第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bに電力が供給されると共に、第2電源21Bによって第2超伝導コイル7Bに電力が供給される。従って、各超伝導コイルに流される電流の大きさを超伝導コイル毎に個別に制御することが可能となり、一对の磁極3,4の間に形成される磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。また、コイル部7においてクエンチが発生した場合に、遮断器24を動作させることによって、保護抵抗23、第1超伝導コイル7A及び第2超伝導コイル7Bが互いに直列に接続された閉回路が形成される。従って、コイル部7の各超伝導コイルを流れていた電流は、保護抵抗23を介する閉回路を流れることとなるため、各超伝導コイルを流れる電流は一律に減衰する。以上により、各超伝導コイルにおいて、保護回路の抵抗によって電流が十分に減衰するまでの時間に差が生じないため、クエンチが発生した場合に、超伝導コイルに働く力を抑制することができる。

10

【0050】

以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明は、上記実施形態に限定されるものではない。

【0051】

例えば、図3に示されるように、超伝導サイクロトロン1は、複数対の超伝導コイルを備えていてもよい。具体的に、超伝導サイクロトロン1では、コイル部7は、一对の磁極3,4をそれぞれ囲むように設けられた第3超伝導コイル7C及び第4超伝導コイル7Dを更に有し、第1超伝導コイル7A、第2超伝導コイル7B、第3超伝導コイル7C及び第4超伝導コイル7Dは直列に接続されていてもよい。このとき、電力供給部20は、正側P3が第3超伝導コイル7Cの一端側S5に接続されていると共に負側N3が第3超伝導コイル7Cの他端側S6に接続されている第3電源21Cと、正側P4が第4超伝導コイル7Dの一端側S7に接続されていると共に負側N4が第4超伝導コイル7Dの他端側S8に接続されている第4電源21Dと、を有してもよい。この場合、一对の磁極3,4の間に生じる磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。

20

【0052】

また、超伝導サイクロトロン1では、コイル部7は、第3超伝導コイル7C及び第4超伝導コイル7Dからなる対を複数有してもよい。すなわち、コイル部7は、2つ以上の第3超伝導コイル7Cと、2つ以上であって第3超伝導コイル7Cと同数の第4超伝導コイル7Dを有していてもよい。この場合、一对の磁極3,4の間に生じる磁場の強さ及び向きを精度良く調整することができる。

30

【0053】

また、上記実施形態では、超伝導電磁石5は超伝導サイクロトロン1に用いられるものとして説明したが、これに限定されず、超伝導電磁石5はMRI、MCZ法によるシリコン単結晶引き上げ装置等に用いられてもよい。

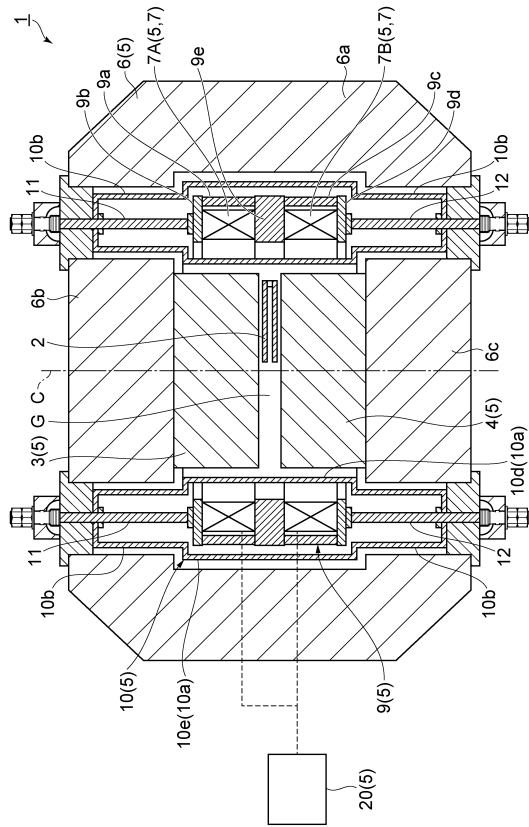
【符号の説明】

【0054】

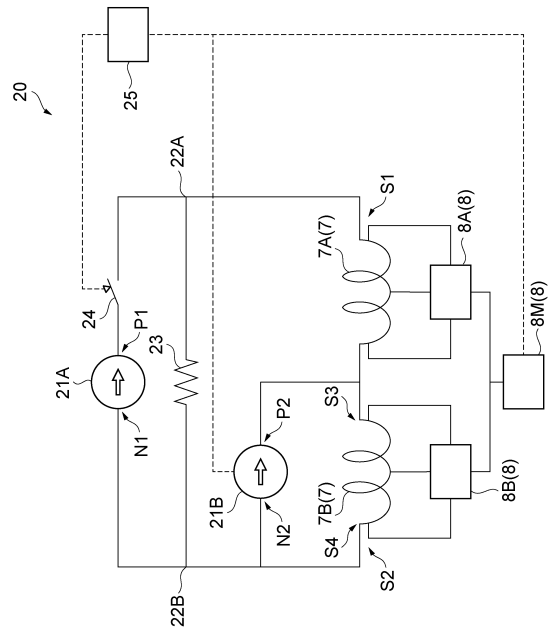
3,4...磁極、2...ディ電極(加速電極)、7...コイル部、7A...第1超伝導コイル、7B...第2超伝導コイル、20...電力供給部、21A...第1電源、21B...第2電源、22A...第1分岐点、22B...第2分岐点、23...保護抵抗(抵抗)、24...遮断器。

40

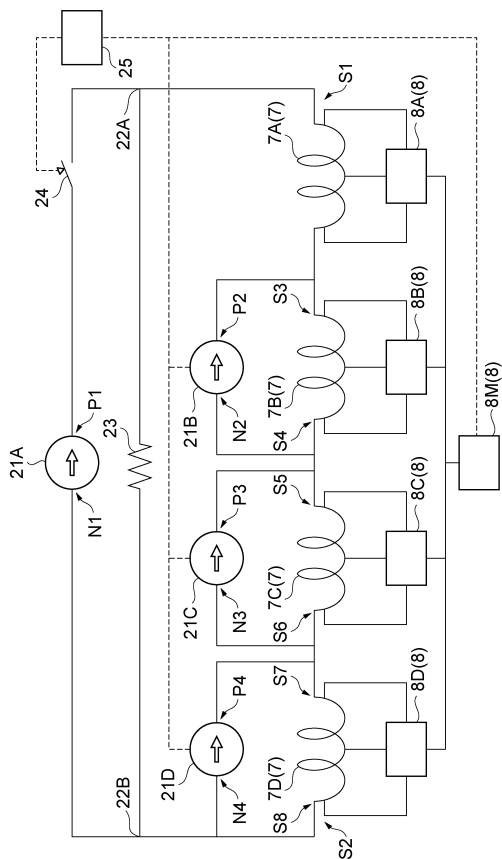
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2014-086457(JP,A)
特開昭59-158505(JP,A)
特開2011-138892(JP,A)
特開2015-153733(JP,A)
特開平01-243400(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01F	6/00
H01F	6/02
H05H	13/00
H01L	39/04