

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5481070号
(P5481070)

(45) 発行日 平成26年4月23日 (2014. 4. 23)

(24) 登録日 平成26年2月21日 (2014. 2. 21)

(51) Int. Cl.		F I	
H05H 7/04	(2006.01)	H05H 7/04	
H05H 13/00	(2006.01)	H05H 13/00	
H05H 13/02	(2006.01)	H05H 13/02	
H01F 6/00	(2006.01)	H01F 7/22	
H01F 6/04	(2006.01)	H01F 7/22	

A
請求項の数 45 (全 29 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2008-551427 (P2008-551427)
(86) (22) 出願日	平成19年1月19日 (2007. 1. 19)
(65) 公表番号	特表2009-524200 (P2009-524200A)
(43) 公表日	平成21年6月25日 (2009. 6. 25)
(86) 国際出願番号	PCT/US2007/001506
(87) 国際公開番号	W02007/084701
(87) 国際公開日	平成19年7月26日 (2007. 7. 26)
審査請求日	平成22年1月8日 (2010. 1. 8)
(31) 優先権主張番号	11/337, 179
(32) 優先日	平成18年1月19日 (2006. 1. 19)
(33) 優先権主張国	米国 (US)
(31) 優先権主張番号	60/760, 788
(32) 優先日	平成18年1月20日 (2006. 1. 20)
(33) 優先権主張国	米国 (US)

(73) 特許権者	596060697
	マサチューセッツ インスティテュート オブ テクノロジー アメリカ合衆国マサチューセッツ州021 39ケンブリッジ, マサチューセッツ・ア ヴェニュー・77
(74) 代理人	100078282
	弁理士 山本 秀策
(74) 代理人	100062409
	弁理士 安村 高明
(74) 代理人	100113413
	弁理士 森下 夏樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 粒子加速のための磁場生成方法、磁石構造体及びその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

イオン加速器における使用のための磁石構造体であって、

4 . 5 Kの温度において超伝導である材料の連続的な経路を備え、加速チャンバと該加速チャンバを横断して延びる中心軸のセグメントを放射方向に制限する少なくとも2つのコイルを含むコールドマス構造体であって、中央加速面が該加速チャンバを横断して該中心軸から直交方向に延びる、コールドマス構造体と、

該コールドマス構造体を覆う磁石ヨークであって、該磁石ヨークはまた該中心軸のセグメントを放射方向に制限し、該磁石ヨークは、該中心軸の近くの極先端と、該極先端の半径方向距離よりも大きい、該中心軸からの半径方向距離において極翼とを有する1対の磁極を含み、該1対の磁極は、内面を有し、該内面は、内段にわたって、半径方向距離の増加につれて極間隙を増加させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に拡大し、外段にわたって、半径方向距離の増加につれて該極間隙を減少させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に縮小するように先細になっており、該極先端と該極翼との間の位置において、該極先端間の該極間隙の2倍を超え、かつ該極翼間の該極間隙の2倍を超える、ピーク間隙を生成する、磁石ヨークと

を備えている、磁石構造体。

【請求項2】

前記少なくとも2つのコイルは液体冷媒に浸漬されておらず、前記磁石構造体は、該少なくとも2つのコイルを冷却するために、前記コールドマス構造体に結合されたクライオ

クーラをさらに備えている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 3】

前記クライオクーラは、ギフォード - マクマホーンクライオクーラまたはパルスチューブクライオクーラである、請求項 2 に記載の磁石構造体。

【請求項 4】

前記少なくとも 2 つのコイルが収容されるクライオスタットをさらに備えている、請求項 2 に記載の磁石構造体。

【請求項 5】

前記超伝導材料は $NbTi$ または Nb_3Sn である、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 6】

前記超伝導材料は Nb_3Sn である、請求項 4 に記載の磁石構造体。

【請求項 7】

前記超伝導材料は Al5 第 2 種超伝導体である、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 8】

前記コールドマス構造体は、前記少なくとも 2 つのコイルが装着されるボビンをさらに備えている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 9】

前記コールドマス構造体に結合された半径方向張力リンクをさらに備え、該半径方向張力リンクは、外向きの半径方向の力を該コールドマス構造体に加えるように構成される、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 10】

前記少なくとも 2 つのコイルは、前記中心軸から直交して測定されるとき、51 cm 以下の外側半径を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 11】

前記磁石ヨークは、前記中心軸から直交して測定されるとき、114 cm 以下の外側半径を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 12】

前記1 対の磁極間の前記ピーク間隙は少なくとも 37 cmであり、該1 対の磁極間の最小の間隙の 3 倍よりも大きい、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 13】

前記極翼は、前記中央加速面に対して 90°未満の角度で、前記中心軸からの半径方向距離の増加につれて該中央加速面に向かって傾斜する内面を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 14】

前記極翼の前記内面は、前記中央加速面に対して 80°より大きい角度で、前記中心軸からの半径方向距離の増加につれて該中央加速面に向かって傾斜する、請求項 13 に記載の磁石構造体。

【請求項 15】

前記磁石ヨークは、前記加速チャンバ内の粒子加速電圧を生成するための、前記1 対の磁極間に電極を含む共振器構造を収容する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 16】

収束磁場指数パラメータ n は、イオン導入のための内側半径からイオン抽出のための外側半径までの前記中央加速面内において 0 から 1 の範囲内にあり、 $n = - (r / B) (dB / dr)$ かつ $dB / dr < 0$ であり、ここで B は磁場であり、 r は前記中心軸からの半径である、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 17】

前記少なくとも 2 つのコイルに結合される電源をさらに備えている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 18】

シンクロサイクロトロンにおける使用のための磁石構造体であって、

10

20

30

40

50

少なくとも2つの超伝導コイルを含むコールドマス構造体であって、該コールドマス構造体は加速チャンバの範囲を定める、コールドマス構造体と、

該コールドマス構造体の周囲を覆い、1対の磁極を含む磁石ヨークであって、該1対の磁極は、該1対の磁極の間かつ該加速チャンバを横断する極間隙を画定する、磁石ヨークと、

該ヨークを囲む一体型磁気シールドとを備えており、

該1対の磁極は、内面を有し、該内面は、内段にわたって、半径方向距離の増加につれて極間隙を増加させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に拡大し、外段にわたって、半径方向距離の増加につれて該極間隙を減少させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に縮小するように先細になっている、磁石構造体。

10

【請求項19】

前記一体型磁気シールドは、前記磁石ヨークから延びる大部分の磁力線が、複数の位置で、複数の角度で該一体型磁気シールドと交差するように構成される蛇行形状を有する、請求項18に記載の磁石構造体。

【請求項20】

前記一体型磁気シールドは、前記加速チャンバ内に8テスラの磁場を生成するために、前記少なくとも2つの超伝導コイルに電圧を印加したときに、前記ヨークの外側の前記磁石構造体によって生成され得る1000ガウスの磁束密度の輪郭の外側にある、請求項18に記載の磁石構造体。

20

【請求項21】

前記一体型磁気シールドは、鉄を含む、請求項18に記載の磁石構造体。

【請求項22】

前記少なくとも2つの超伝導コイルを冷却するために前記コールドマス構造体に結合されたクライオクーラをさらに備えている、請求項18に記載の磁石構造体。

【請求項23】

前記クライオクーラは、前記一体型磁気シールドの境界の外に位置するヘッドを含む、請求項22に記載の磁石構造体。

【請求項24】

前記コールドマス構造体は、中心軸の周りに位置し、前記一体型磁気シールドは該中心軸からより離れた距離においてはより厚い、請求項18に記載の磁石構造体。

30

【請求項25】

前記一体型磁気シールドは、前記磁気ヨークから電氣的に絶縁されている、請求項18に記載の磁石構造体。

【請求項26】

Nb₃Sn超伝導コイルを備えている磁石構造体を製造するための方法であって、スズのワイヤを提供することと、該スズのワイヤの周囲にニオブの母材を提供することと、該ニオブの母材内で該スズのワイヤを加熱して、該スズのワイヤと該母材とを反応させて、それによりNb₃Snの撚り線を形成することと、該Nb₃Snの撚り線を巻いてコイルを形成することと、1対の磁極間の極間隙を画定する1対の磁極を含む磁石ヨーク内に該Nb₃Sn超伝導コイルを挿入することと

40

を包含し、

該1対の磁極は、内面を有し、該内面は、内段にわたって、半径方向距離の増加につれて極間隙を増加させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に拡大し、外段にわたって、半径方向距離の増加につれて該極間隙を減少させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に縮小するように先細になっている、方法。

【請求項27】

巻く前に、前記Nb₃Snの撚り線を、銅のチャンネル内に挿入することと、それぞれが

50

銅のチャネルのそれぞれの区画内にある複数の Nb₃Sn の撚り線の区画を含む断面を有するコイルを形成することとをさらに包含する、請求項 26 に記載の方法。

【請求項 28】

前記 Nb₃Sn を、ガラス繊維で絶縁することをさらに包含する、請求項 27 に記載の方法。

【請求項 29】

エポキシを前記 Nb₃Sn 超伝導コイル内の前記ガラス繊維に含浸させることをさらに包含する、請求項 28 に記載の方法。

【請求項 30】

イオン加速のための磁場を生成するための方法であって、
加速チャンバの範囲を定めるクライオスタット内のコールドマス構造体を提供することであって、該コールドマス構造体は、

中心軸に対して中心を合わせられた少なくとも 2 つの超伝導コイルと、
該コールドマス構造体に熱的に結合されたクライオクーラと、
該コールドマス構造体の周りに位置し、1 対の磁極を含む磁石ヨークであって、該 1 対の磁極は、該 1 対の磁極の間かつ該加速チャンバを横断する先細の極間隙を画定し、該 1 対の磁極は、内段にわたって、半径方向距離の増加につれて極間隙を増加させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に拡大させ、外段にわたって、半径方向距離の増加につれて該極間隙を減少させる連続的な一連の増分において該極間隙を徐々に縮小させる、磁石ヨークと

を含む、ことと、

該超伝導体の臨界温度以下に該少なくとも 2 つの超伝導コイルを冷却し、電圧を該コールドマス構造体に印加して、該加速チャンバ内に少なくとも 8 テスラの総磁場を生成することと

を包含する、方法。

【請求項 31】

前記少なくとも 2 つの超伝導コイルは Nb₃Sn を含む、請求項 30 に記載の方法。

【請求項 32】

少なくとも 9.9 テスラの総磁場が、前記加速チャンバ内に生成される、請求項 31 に記載の方法。

【請求項 33】

半径方向張力リンクが前記コールドマス構造体に結合され、前記方法は、該コールドマス構造体に外向きの半径方向の力を加えて該コールドマス構造体の位置を維持することをさらに包含する、請求項 30 に記載の方法。

【請求項 34】

一体型磁気シールドが、前記コールドマス構造体および前記磁石ヨークによって生成された 1000 ガウスの磁束密度の輪郭の外側のある距離において、該ヨークの周りに提供される、請求項 33 に記載の方法。

【請求項 35】

前記極間隙は、前記内段および前記外段における最小の極間隙の距離の少なくとも 2 倍のピーク極間隙まで増加する、請求項 30 に記載の方法。

【請求項 36】

前記ピーク極間隙は少なくとも 37 cm である、請求項 35 に記載の方法。

【請求項 37】

前記外段における前記最小の極間隙は 1 対の極翼の間であり、該極翼は前記中心軸に対して 0 ~ 10 ° の角度において半径方向距離の増加につれて互いに対して傾斜する内面を有する、請求項 35 に記載の方法。

【請求項 38】

前記コールドマス構造体および前記ヨークは、前記加速チャンバ内に少なくとも約 9 テスラの総磁場を生成する、請求項 30 に記載の方法。

10

20

30

40

50

【請求項 39】

前記少なくとも2つの超伝導コイルは、前記磁場が生成されるとき前記コールドマス構造体内で液体冷媒に浸漬されていない、請求項30に記載の方法。

【請求項 40】

前記少なくとも2つの超伝導コイルは、51cm以下の外側半径を有する、請求項30に記載の方法。

【請求項 41】

前記加速チャンバに、荷電粒子を注入することをさらに包含する、請求項30に記載の方法。

【請求項 42】

前記1対の磁極間に電極を含む共振器構造を提供することと、該電極に無線周波数電圧を印加して、前記加速チャンバを通る外向きの螺旋軌道内で、前記荷電粒子を加速することとをさらに包含する、請求項41に記載の方法。

10

【請求項 43】

中央加速面が、前記中心軸から直交方向に前記加速チャンバにわたって延び、収束磁場指数パラメータ n は、イオン導入のための内側半径からイオン抽出のための外側半径までの該中央加速面内において0から1の範囲内にあり、 $n = - (r / B) (dB / dr)$ かつ $dB / dr < 0$ であり、ここで B は磁場であり、 r は該中心軸からの半径である、請求項30に記載の方法。

【請求項 44】

前記一体型磁気シールドは該磁気シールドが囲む前記ヨークからある間隔で存在する、請求項18に記載の磁石構造体。

20

【請求項 45】

前記磁石構造体はシンクロサイクロトロンの一部である、請求項1に記載の磁石構造体。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

2種類のサイクロトロン（等時性サイクロトロンおよびシンクロサイクロトロン）において磁場を生成するために、超伝導コイルおよび磁極を含む磁石構造体が開発されてきた。シンクロサイクロトロンは、すべてのサイクロトロンと同様に、イオンが導入される中心軸からの外向き螺旋経路における高周波交流電圧によって荷電粒子（イオン）を加速させる。シンクロサイクロトロンはさらに、粒子が加速された際に、印加された電場の周波数が速度増大時における粒子質量の相対論的増大の原因となるように調整されることを特徴とする。シンクロサイクロトロンはまた、極めて小型であってもよく、極間に生成される磁場の大きさを増大させるにつれて、それらのサイズがほぼ立方体状に縮小し得ることも特徴とする。

30

【0002】

磁極が磁氣的に飽和している場合、極間には約2テスラの磁場が生成され得る。しかしながら、参照することによりその全体が本願に援用される特許文献1において記載されているように、シンクロサイクロトロンにおける超伝導コイルの使用は、磁場を最大約5テスラまで増大させることが報告されている。最大約5.5テスラの磁場を生成するためにサイクロトロン内において超伝導コイルを概念的に使用することについてのさらなる考察は、非特許文献1において、さらに、等時性サイクロトロン（磁場は半径に伴って増大する）において8テスラの場合を生成するための超伝導コイルの使用についての考察は、非特許文献2において提供されている。これらの論文はいずれも、<http://www.nsc1.msu.edu/ourlab/library/publications/index.php>から入手可能であり、両論文は参照することによりその全体が本願に援用される。

40

【特許文献1】米国特許第4,641,057号明細書

50

【非特許文献1】X. Wu, "Conceptual Design and Orbit Dynamics in a 250 MeV Superconducting Synchrocyclotron", Ph.D. Dissertation, Michigan State University, 1990

【非特許文献2】J. Kim, "An Eight Tesla Superconducting Magnet for Cyclotron Studies", Ph.D. Dissertation, Michigan State University, 1994

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

10

【0003】

少なくとも2つの超伝導磁石コイル(すなわち、磁場を生成するように構成される超伝導コイル)を含むコールドマス構造体を含む小型磁石構造体が本明細書において説明される。コールドマス構造体は、中央加速面を有する加速チャンバと、該加速チャンバをわたって延びる中心軸のセグメントとの範囲を定める。磁石ヨークは、該コールドマス構造体の周囲を囲み、先細の内面を有する1対の極を含み、該1対の極はその間に極間隙を画定し、該極間の間隙は該加速チャンバをわたって延び、該磁石ヨークは該加速チャンバ内の中心軸のセグメントの半径方向の範囲を定めている。極の内面は(中央加速面の反対側においてほぼ対称に)先細であり、中心軸に近い内側の極先端からの間隙を増加させて、内段にわたって中心軸からのより大きな半径方向の距離におけるピーク間隙において2倍を

20

【0004】

極は、加速チャンバで加速された荷電粒子(イオン)の弱収束の提供、および加速粒子の位相安定性の提供の両方のために、対応して形作られる。弱収束は、磁場を通過して外向き螺旋で加速しながら、荷電粒子を空間内に維持するものである。位相安定性は、チャンバ内において望ましい加速を維持するために十分なエネルギーを荷電粒子が獲得することを確実にする。具体的には、イオン加速を維持するために必要とされるよりも大きい電圧が、常に加速チャンバ内の高圧電極に提供され、磁石構造体は、加速チャンバ内に、これら

30

【0005】

ヨーク内に画定される通路に収納され得る超伝導磁石コイルは、加速チャンバの中央加速面内において極めて高い磁場を直接生成するために使用される。超伝導磁石コイルは、有効にされると、磁石ヨークも磁場を生じさせるように当該磁石ヨークを「磁気化」し、当該磁場は、磁石コイルによって直接生成された場とは異なると考えられ得る。両方の磁場成分(すなわち、コイルから直接生成された成分および磁気化されたヨークによって生成された成分の両方)は、中央加速面に対してほぼ直角に、中央加速面を通過する。しかしながら、中央加速面において完全に磁気化されたヨークによって生成される磁場は、当該面において超伝導磁石コイルによって直接生成される磁場よりもはるかに小さい。磁石ヨークの極の先細の表面は、シンクロサイクロトロン内におけるその使用を可能にするために、中央加速面に沿って、中心軸から加速チャンバの周辺部までの半径を増大させるにつれて減少するような磁場を形作るように構成される。

40

【0006】

他の実施形態において、加速チャンバ内に形成磁場を生成して、弱収束および位相安定性の両方を提供するために、追加の磁石コイルが使用される。(ここでは「1次」コイルと称される先の段落における超伝導コイルを有する)これらの追加のコイルは、先細の極

50

表面の代わりに、または該表面と共に用いられ得るが、その結果は加速チャンバ内の中央加速面にわたる磁場の類似の形状である。

【 0 0 0 7 】

2つの超伝導コイルは、加速面の向かい合う側に対称的に配置され、真空クライオスタット内の引張要素によって吊着されたコールドボビン内に装着される。コールドマス構造体を取り囲んでいるのは、例えば低炭素鋼で形成された磁石ヨークである。コールドマス構造体およびヨークは共に、イオン加速用の極間にある真空ビームチャンバの加速面内において、例えば約7テスラ以上（特定の実施形態においては、9テスラ以上）の混合場を生成する。超伝導コイルは、当該チャンバ内において、コイルが超伝導状態で設置されている場合、および、当該コイルを通る連続的な電流の流れを開始および維持するために、電圧がそれに印加されている場合、約5テスラ以上（特定の実施形態においては、約7テスラ以上）の磁場の実質的過半数を生成する。ヨークは、超伝導コイルが生成した場によって磁化され、イオン加速用にチャンバ内で生成された磁場にさらに2テスラをもたらすことができる。

10

【 0 0 0 8 】

高い磁場によって、磁石構造体を非常に小さくすることができる。加速面内に7テスラの混合磁場を有する実施形態において、磁石ヨークの外半径は45インチ（約114cm）以下である。より高い磁場で使用するために設計された磁石構造体においては、磁石ヨークの外半径はさらに小さくなるであろう。磁石構造体のさらなる特定の実施形態は、中央加速面内の磁場が、例えば8.9テスラ以上、9.5テスラ以上、10テスラ以上、7~13テスラのその他の場、および13テスラを超える場である場合に使用するように設計される。

20

【 0 0 0 9 】

コイルの半径は、20インチ（約51cm）以下であってもよく、ここでも、増大した磁場で使用するためにはさらに小さいものとなる、コイル中の超伝導材料は、加速用の極間隙内に9.9テスラ以上の開始磁場を生成するために使用され得るNb₃Snであってもよいし、加速用の極間隙内に8.4テスラ以上の開始磁場を生成するために使用され得るNbTiであってもよい。特定の実施形態において、各コイルは、Al5Nb₃Sn第2種超伝導体で形成される。コイルは、反応Nb₃Sn複合導体を円環形状または同心円状の輪のセットの形態に巻くことによって形成されてもよい。複合導体は、銅チャンネル内にはんだ付けされた反応Nb₃Snワイヤのケーブル、またはケーブル単体であってもよい。ケーブルは、銅およびバリア材を有する前駆体スズおよびニオブ成分の、所定数の撚り線から組み立てられる。続いて、巻き撚り線を加熱し、母材成分と反応させてNb₃Snを形成し、このとき、構造体中のニオブ含有量は、撚り線の断面の周辺部に近づくにつれて増大する。

30

【 0 0 1 0 】

また、電圧源と連結された導電ワイヤで各コイルの周囲を覆ってもよい。その後、動作中にコイルがまずその内端における超伝導性を喪失し始めた際にワイヤに十分な電圧を印加することにより、当該ワイヤを使用して超伝導コイルを「クエンチ」する（すなわち、コイル全体を超伝導ではなく「正常」にすることができ、それにより、高抵抗の局所的ホットスポットを伴う動作の可能性を排除することによってコイルを守ることができる。あるいは、ステンレス鋼またはその他の伝導金属（銅または黄銅等）のストリップをコイル周辺部に付着させるか、コイルに埋め込んでもよく、それにより、電流がストリップを通過する際に、超伝導状態をクエンチするようにコイルが加熱され、それによってコイルを保護する。

40

【 0 0 1 1 】

動作中、コイルは「乾燥」状態に維持される（すなわち、液体冷媒に浸漬されない）ことができ、それどころか、コイルは、クライオクーラによって超伝導体の臨界温度を下回る温度まで冷却され得る。さらに、コールドマス構造体は、動作中に生成される特に高い磁場の存在および影響下において、コールドマス構造体の中心が中心軸となるように保つ

50

役割を果たす複数の放射状引張部材と連結されてもよい。

【0012】

また、イオン加速器は、イオンが形成され、加速軌道に捕獲され、最終エネルギーまで加速され、その後、多数のイオンビーム応用において使用するために抽出される、適切な小型ビームチャンバ、ディー、および共振器構造を有し得る。ビームチャンバ、共振器、およびディー構造は、超伝導磁石構造体の極間の開放空間内に存在し、したがって磁石構造体はこれらのコンポーネントを収容するように構成される（一方で依然特定の磁場形成を提供することも可能である）。ビームチャンバは、イオンビーム形成用の設備を含む。イオンは、内部イオン源において形成されてもよいし、イオン注入構造を有する外部イオン源によって提供されてもよい。ビームチャンバは真空にされ、さらに無線周波数（RF）加速構造の接地面としての役割を果たす。RF加速構造は、加速間隙を画定する単数または複数のディー、その他の表面および構造体と、外部生成器から単数または複数のディーの励起用のビームチャンバへ周波数波を伝達する手段と、を含む。

10

【0013】

またさらに、ヨークを取り囲み、そこから生成される外部磁場を収納するために、一体型磁気シールドを設けてもよい。一体型磁気シールドは、（ヨークと同様に）低炭素鋼で形成されてもよく、磁石構造体によってその動作中に生成され得る1,000ガウスの磁束密度の輪郭の外側に配置される。シールドは、種々の配向を有する磁場の閉じ込め改善を可能にするために、ヨークから延在する磁束線が、複数の場所および複数の角度で一体型磁気シールドと交差するような蛇行形状を有し得る。クライオクーラのヘッドおよび高い磁場に敏感なその他の能動素子は、一体型磁気シールドの外側に配置される。

20

【0014】

本開示の装置および方法は、極めて小型の構造体からの高い磁場の生成を可能にし、それにより、高エネルギー（かつ短波長）の粒子の点状のビーム（すなわち、小さい空間的断面を有するもの）の生成を可能にする。また、本開示の一体型磁気シールドは、そこから生成された磁場の優れた閉じ込めを可能にする。本開示の小型構造体は、粒子加速器内において多種多様な用途に使用されることができ、当該加速器は、輸送可能な形態、例えばカートまたは車両内で使用され、セキュリティシステム内のポート、またはその他の種類の輸送センター等において、診断使用または脅威検出のためのエネルギーイオンの一時的な源を提供するために再配置されることができる。したがって加速器は、専用の加速器施設だけでなく、必要な場所において使用され得る。またさらに、加速器は、種々の異なる源位置から、加速器の加速イオンを標的に照射するために、例えば単室システム内の固定標的（例えば、医療患者）周囲における加速器の移動用のガントリーに装着され得る。

30

【0015】

以下で説明する添付の図面において、類似の参照文字は、異なる図にわたり、同じまたは同様の部分を指す。図面は必ずしも縮尺どおりではなく、「詳細の説明」で特徴付けられる方法および装置の特定の原理を説明することを重要視している。

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

本願において記載する発明の多くは、シンクロサイクロトロンにおける実装を超える広範な適用性（例えば、等時性サイクロトロンにおいて、ならびに、超伝導体を用いる、および/または高磁場を生成するためのその他の用途において）を有し、その他の状況においても容易に用いられ得る。しかしながら、参照しやすいように、本明細書ではシンクロサイクロトロンの状況における根本的な原理および特徴の説明から始める。

40

【0017】

シンクロサイクロトロンは概して、イオン種の電荷 Q 、加速されたイオンの質量 M 、加速電圧 V_0 、最終エネルギー E 、中心軸からの最終半径 R 、および中心場 B_0 を特徴とし得る。パラメータ B_0 および R は最終エネルギーに関するものであるため、1つだけを設定する必要がある。特に、パラメータ Q 、 M 、 E 、 V_0 、および B_0 のセットによって、シンクロサイクロトロンを特徴付けることが可能である。本開示の高磁場超伝導シンクロ

50

サイクロトロンは、同期加速の原理を受けて、特に Q 、 M 、 V_0 、 E 、および B_0 のイオンを作成、加速、および抽出するために機能する多数の重要な特徴および要素を含む。また、中心場だけが上昇し、その他の主要パラメータはすべて一定に保持される場合、比例して加速器の最終半径が減少し、シンクロサイクロトロンがより小型になることが分かる。中心場 B_0 の増大に伴うこの全体的な小型化は、第3の力 R_3 までの最終半径によってほぼ特徴付けることができるものであり、以下の表に示すが、磁場の増大が大きいと、シンクロサイクロトロンの近似体積が大きく減少する。

【0018】

【表1】

B_0 (テスラ)	R (m)	$(R/R_1)^3$
1	2.28	1
3	0.76	1/27
5	0.46	1/125
7	0.33	1/343
9	0.25	1/729

10

20

上記の図表中の最後の列は体積スケーリングを表しており、各行において、 R_1 は2.28 mの極半径、 B_0 は1テスラ、 R は中心場 B_0 の対応する半径である。この場合、 $M = i_{iron} V$ 、かつ $E = K (R B_0)^2 = 250 \text{ MeV}$ であり、ここで V は体積である。

30

【0019】

この中心場 B_0 の増大によって著しく変化する1つの要因は、減少すると思われるシンクロサイクロトロンのコストである。著しく変化するもう1つの要因は、シンクロサイクロトロンの可搬性である、すなわち、シンクロサイクロトロンは再配置がより容易なはずであり、例えばシンクロサイクロトロンを次にガントリーに設置し、癌放射線療法のために患者の周囲で動かすことができる、または、点状粒子のエネルギービームを利用するゲートウェイ・セキュリティ・スクリーニングアプリケーション等のモバイルアプリケーションで使用するために、シンクロサイクロトロンをカートもしくは貨物自動車に設置することができる。場の増大によって変化するもう1つの要因はサイズである、すなわち、シンクロサイクロトロンのすべての特徴および本質的要素、ならびにイオン加速の特性は、場の増大に伴って実質的にサイズも減少させる。本願において記載するのは、磁場を生成する超伝導磁石構造体を使用して磁場を上昇させることにより、シンクロサイクロトロンの全体的なサイズを(固定イオン種および最終エネルギーのために)著しく減少させることができる方法である。

40

【0020】

磁場 B_0 が増大するに伴い、シンクロサイクロトロンは、所与のエネルギー E 、電荷 Q 、質量 M 、および加速電圧 V_0 に必要な磁気エネルギーを生成するための構造体を所有する。この磁気構造体は、同期粒子加速の必要な総磁場および場の形状特性を生成しながら

50

、当該構造体の超伝導素子に安定性および保護を提供し、同じく中心場 B_0 の増大に伴って発生する大きな電磁力を緩和し、超伝導コールドマスへの冷却を提供する。

【0021】

11.2テスラのピーク場において動作する Nb_3Sn 伝導体ベースの超伝導コイル（図示せず）を有する、9.2テスラの250 MeVの陽子超伝導シンクロサイクロトロン、ヨーク36、ディー48、および共振器構造174を図1に示す。このシンクロサイクロトロン解は、X.Wuのミシガン州立大学でのPh.D論文「Conceptual Design and Orbit Dynamics in a 250 MeV Superconducting Synchrocyclotron (1990)」における、5.5テスラで得られる解からの新しいスケーリング法に基礎を置いたものであり、Wuの論文は、シンクロサイクロトロンのための設計において、その時点で最も高い中心場 (B_0) レベル - - 詳細な解析結果において提供された、または動作中に実験的に実証された - - を示唆したものであると考えられる。

10

【0022】

これらの高磁場スケーリング則は、新しいイオン種が本願において提供される特定の例のものと同じであることを必要とせず（すなわち、スケーリング則は単なる250 MeVおよび陽子よりも一般的である）、電荷 Q と質量 M は事実上異なってもよく、スケーリング解は、異なる Q および M を有する新しい種のために決定されてもよい。例えば、別の実施形態において、イオンは +6 電荷と引き換えに電子を失った炭素原子（すなわち、 $^{12}C^{6+}$ ）であり、本実施形態においては、低質量低電荷の粒子と比較して、あまり極端でない場成形（例えば、極表面のプロファイルがより平坦となる）が必要となるであろう。また、新しいスケールエネルギー E は、以前の最終エネルギーと異なっている場合がある。またさらに、 B_0 も変化する場合がある。これらの変化のそれぞれにより、シンクロサイクロトロンの加速モードを守ることができる。

20

【0023】

強磁性鉄ヨーク36は、ビームチャンバ、ディー48、および共振器構造174が存在する加速領域を取り囲んでおり、ヨーク36は、上部磁石クライオスタットキャピティ118および下部磁石クライオスタットキャピティ120で示される、磁石クライオスタットのための空間も取り囲んでいる。加速システムのビームチャンバ、ディー48、および共振器構造174は、20 kV未滿の加速電圧 V_0 において $E = 250$ MeVの陽子ビーム ($Q = 1$ 、 $M = 1$) 用にサイズ決定される。強磁性鉄のコアおよびリターンヨーク36は、組み立ておよび保守を容易にするために分割構造として設計され、35インチ（約89 cm）未滿の外半径と、40インチ（約100 cm）未滿の全高と、25トン（約3,000 kg）未滿の全質量とを有する。ヨーク36は、室温に維持される。この特定の解は、ガントリー、プラットフォーム、もしくは貨物自動車、または、適用部位における固定位置等、小型の高磁場超伝導シンクロサイクロトロンによって可能になるものとして識別した先の用途のいずれかにおいて使用され得る。

30

【0024】

明確にするために、高磁場シンクロサイクロトロン動作のための強磁性鉄ヨーク構造体36のその他多数の特徴は図1には示していない。これらの特徴は図2に示す。シンクロサイクロトロンの構造体は、その主軸16について360度の回転対称に近く、本願の他の箇所でも示すように、特定の場所における離散的なポートおよびその他の離散的特徴を可能にする。シンクロサイクロトロンは、強磁性ヨーク36の鏡対称面であり、スプリットコイル対12および14の中央面である中央加速面18も有し、中央加速面は、ビームチャンバ（極38と40との間に画定される）、ディー48、および共振器構造174の、ならびに加速中の粒子軌跡の鉛直方向中央でもある。高磁場シンクロサイクロトロンの強磁性ヨーク構造体36は、複数の要素から成る。磁石極38および40は、シンクロサイクロトロンの中心軸16の周囲に並べられ、それぞれ約3インチ（約7.6 cm）の直径を有する、上部中央通路142および下部中央通路144を画定し、これにより、加速チャンバ46の中心領域にある中央面18の主軸16に配置されたイオン源の挿入および

40

50

除去のためのアクセスを提供する。

【 0 0 2 5 】

詳細な磁場構造が利用されることにより、イオンの安定した加速を提供する。詳細な磁場構成は、初期加速用の上部および下部の極チップ輪郭 1 2 2 および 1 2 4 ならびに上部および下部の極輪郭 1 2 6 および 1 2 8 の成形による強磁性鉄ヨーク 3 6 の成形によって、および、高磁場加速用の上部および下部の極輪郭 1 3 0 および 1 3 2 を形作ることによって提供される。図 2 の実施形態において、上部および下部の極輪郭 1 3 0 と 1 3 2 との間の最大極間隙（上部および下部の極翼 1 3 4 および 1 3 6 に隣接する）は、上部および下部の極輪郭 1 2 6 と 1 2 8 との間の最大極間隙のサイズの 2 倍より大きく、上部および下部の極チップ輪郭 1 2 2 および 1 2 4 における最少極間隙のサイズの 5 倍より大きい。図示するように、上部および下部の極チップ輪郭 1 2 2 および 1 2 4 の傾斜は、隣接する初期加速用の上部および下部の極輪郭 1 2 6 および 1 2 8 の傾斜よりも急勾配である。高磁場加速用の上部および下部の極輪郭 1 3 0 および 1 3 2 の傾斜は、中心（主）軸 1 6 からの半径方向距離を増大させる関数として極間隙が拡張する速度を増大させるために、上部および下部の極輪郭 1 2 6 および 1 2 8 の比較的軽い傾斜を超えて、ここでも実質的に増大（輪郭 1 3 0）および減少（輪郭 1 3 2）する。

10

【 0 0 2 6 】

半径方向に外向きに動かすと、上部および下部の極翼 1 3 4 および 1 3 6 の表面の傾斜は上部および下部の極輪郭 1 3 0 および 1 3 2 の傾斜よりもさらに急勾配になり（かつそれに反比例し）、そのため、極間隙のサイズは、極翼 1 3 4 と 1 3 6 との間の半径を増大させるにつれて（5 分の 1 以下に）急降下する。したがって、極翼 1 3 4 および 1 3 6 の構造は、コイル 1 2 および 1 4 に近接する内部磁場線を捕捉することにより、加速チャンバの外周辺部に向かってコイル 1 2 および 1 4 によって生成される磁場からの実質的な防護を提供し、それによって、それらの捕捉された磁場線を越えた場の降下を尖鋭化する。翼 1 3 4 と表面 1 3 0 の接合部と翼 1 3 6 と表面 1 3 2 の接合部との間にある最も遠い間隙は、約 3.7 cm である。この間隙はその後、急激に狭くなり（中央加速面 1 8 に対して 80 ~ 90 % の角度 例え、約 85 ° の角度で）、チップ 1 3 8 と 1 4 0 との間は約 6 cm となる。したがって、極翼 1 3 4 と 1 3 6 との間の間隙は、極間の最も遠い間隙のサイズの 3 分の 1 未満（またはさらに 5 分の 1 未満）である場合がある。コイル 1 2 と 1 4 との間の間隙は、本実施形態において、約 1.0 cm である。

20

30

【 0 0 2 7 】

コイルからの磁場が増大する実施形態において、コイル 1 2 および 1 4 は、より多くのアンペアターンを含み、互いにさらに分裂し、また、各翼 1 3 4 および 1 3 6 のより近くに配置される。さらに、増大した場のために設計された磁石構造体において、極間隙は輪郭 1 2 6 と 1 2 8 との間、および輪郭 1 3 0 と 1 3 2 との間で増大し、一方、極間隙は、周辺チップ 1 3 8 と 1 4 0 との間（例えば、1.4 テスラの場合に設計された磁石構造体においては約 3.8 cm まで）、および中心チップ 1 2 2 と 1 2 4 との間で狭くなる。またさらに、これらの実施形態において、翼 1 3 4 および 1 3 6 の厚さ（加速面 1 8 に対して平行に計測）が増加する。さらに、印加される電圧が低いほど、イオンの軌道はより小さく数が多くなり、軸方向および半径方向のビーム広がり小さくなる。

40

【 0 0 2 8 】

図 2 に示すこれらの輪郭変化は、各高磁場シンクロサイクロトロンスケールン解に関する単なる代表例であり、位相安定加速および弱収束に適応するために異なる数の極先細変化があってもよく、表面は滑らかに変動する輪郭を有してもよい。イオンは、半径 r に沿って拡張する螺旋形態の平均軌跡を有する。イオンはまた、この平均軌跡の周囲で小さい直交振動を受ける。これらの平均半径周囲での小さい振動は、ベータトロン振動として知られており、加速イオンの特定の性質を定義するものである。

【 0 0 2 9 】

上部および下部の極翼 1 3 4 および 1 3 6 は、特徴的な軌道共鳴を動かすことにより、抽出のために磁場端を尖鋭化し、これによって最終的に得られるエネルギーを極端部の近

50

くに設定する。上部および下部の極翼 1 3 4 および 1 3 6 はさらに、内部加速場を強力なスプリットコイル対 1 2 および 1 4 から防護する役割を果たす。従来の再生シンクロサイクロトロン抽出または自己抽出は、十分な非軸対称性の端部磁場を確立するために、強磁性の上部および下部の鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 のさらなる局在的な切片を、上部および下部の極翼 1 3 4 および 1 3 6 の正面の周囲に円周方向に置くことによって適応させられる。

【 0 0 3 0 】

特定の実施形態において、鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 は、その間にある間隙によって上部および下部の各極翼 1 3 4 および 1 3 6 から隔てられており、したがって鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 はビームチャンバの内部に組み込まれることができ、それにより、チャンバ壁は当該間隙を通過する。鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 は、別々に固定されるが、依然として磁気回路内にある。

10

【 0 0 3 1 】

その他の実施形態において、図 3 に示すように、鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 または極翼 1 3 4 および 1 3 6 は、それらの場面において磁場をそれぞれ縮小および増大させるために、例えばスロット 2 0 2 および延在部 2 0 4 を含み、中心軸 1 6 の周囲において非対称であってもよい。さらに他の実施形態において、鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 は、極 3 8 および 4 0 の円周の周囲において連続的ではなく、間隙によって隔てられた別個のセグメントの形態であり、当該間隙において、より低い局所磁場が生成される。さらに別の実施形態において、鉄製チップ 1 3 8 および 1 4 0 の組成を変動させること、または、異なる磁気特性を有する選択された材料を、チップ 1 3 8 および 1 4 0 の円周周囲の異なる位置に組み込むことにより、異なる局所磁場が生成される。磁石ヨーク内の他の場所の組成も、磁場を形作るため（すなわち、場を上昇または低下させるため）、必要に応じて（例えば、加速されたイオンに弱収束および位相安定性を提供するために）、特に中央加速面の領域を形作るために、変動し得る（例えば、異なる磁気特性を有する異なる材料を提供することによって）。

20

【 0 0 3 2 】

強磁性鉄ヨーク 3 6 内に画定された複数の半径方向通路 1 5 4 は、シンクロサイクロトロンの中央面 1 8 を経由するアクセスを提供する。中央面通路 1 5 4 は、ビーム抽出、ならびに共振器内部伝導体 1 8 6 および共振器外部伝導体 1 8 8 の貫通のために使用される（図 5 参照）。極間隙体積中のイオン加速構造体にアクセスするための代替的な方法は、上部軸方向 R F 通路 1 4 6 経由および下部軸方向 R F 通路 1 4 8 経由である。

30

【 0 0 3 3 】

コールドマス構造体およびクライオスタット（図示せず）は、リード線、起寒剤、構造支柱、および真空ポンプのための多数の貫通部を含み、これらの貫通部は、上極クライオスタット通路 1 5 0 および下極クライオスタット通路 1 5 2 を通り、強磁性のコアおよびヨーク 3 6 内に収容される。クライオスタットは、非磁性体（例えば、Special Metals Corporation (Humington, West Virginia, USA) から市販されている INCONEL ニッケルベース合金）で構成される。

40

【 0 0 3 4 】

強磁性鉄ヨーク 3 6 は、超伝導コイル 1 2 および 1 4 によって生成される磁束を加速チャンバ 4 6 へ搬送する磁気回路を備える。磁気回路は、ヨーク 3 6 を介して、上極チップ 1 0 2 および下極チップ 1 0 4 においてシンクロサイクロトロン弱収束のための場成形も提供する。磁気回路はまた、磁束の大部分を当該磁気回路の外側部分に収納することにより、加速チャンバ内の磁場レベルを向上させ、当該回路は、強磁性ヨーク要素、対応する下極ルート 1 0 8 を有する上極ルート 1 0 6 と、対応する下部リターンヨーク 1 1 2 を有する上部リターンヨーク 1 1 0 とを含む。強磁性ヨーク 3 6 は、飽和していても加速チャンバ 4 6 内にイオン加速用の場成形を提供する、強磁性物質で作られている。

【 0 0 3 5 】

50

上部および下部の磁石クライオスタットキャビティ 1 1 8 および 1 2 0 は、上部および下部の超伝導コイル 1 2 および 1 4 だけでなく、図示されていない、これらのコイルを取り囲む超伝導コイルドマスの構造体およびクライオスタットも収納する。

【 0 0 3 6 】

コイル 1 2 および 1 4 の場所および形状も、 B_0 が著しく増大している場合、所与の E 、 Q 、 M 、および V_0 のための新しいシンクロサイクロトロン軌道解のスケージングにとって重要である。上部コイル 1 2 の底面 1 1 4 は、底部コイル 1 4 の向かい側の上面 1 1 6 と向かい合う。上極翼 1 3 4 は上部コイル 1 2 の内面 6 1 と向かい合い、同様に、下極翼 1 3 6 は下部コイル 1 4 の内面 6 2 と向かい合う。

【 0 0 3 7 】

付加的な防護がない場合、集中した高磁場レベル（高磁場超伝導シンクロサイクロトロンの内側または強磁性ヨーク 3 6 の外面付近）は、磁気引力または磁化効果により、近隣の人員および設備に潜在的危険をもたらすであろう。必要とされる場レベルの全体的な外部削減用にサイズ決定された強磁性体の一体型外部シールド 6 0 が、シンクロサイクロトロンから離れた磁場を最小化するために使用され得る。シールド 6 0 は、層の形態であってもよいし、追加的な局所防護のための回旋状表面を有してもよく、また、シンクロサイクロトロン修理のため、および、サイクロトロンから離れた最終外部ビーム輸送システムのための通路を有してもよい。

【 0 0 3 8 】

シンクロサイクロトロンは、円形クラスの粒子加速器のメンバである。円形粒子加速器のビーム理論は非常に発達しており、平衡軌道および平衡軌道周囲のベータトロン振動という 2 つの主要概念に基づいている。平衡軌道 (Equilibrium Orbit) (EO) の原理は、以下のように説明できる。

- ・ 磁場により捕獲された所与の運動量の電荷は、軌道を描く。
- ・ 閉軌道は、所与の電荷、運動量、およびエネルギーの平衡状態を表す。
- ・ 場は、平行軌道の円滑な設定を搬送するためのその能力を分析され得る。
- ・ 1 つの平衡軌道から別の平衡軌道への遷移として加速が見られる。

一方、摂動論の弱収束原理は、以下のように説明できる。

- ・ 粒子は、平均軌跡（中心光線としても知られる）の周囲で振動する。
- ・ 振動周波数 (ν_r , ν_z) は、それぞれ半径方向 (r) および軸方向 (z) の運動を特徴付ける。

- ・ 磁場は、座標場成分と磁場指数 (n) とに分解され、

【 0 0 3 9 】

【 数 1 】

$$\nu_r = \sqrt{1-n}$$

であり、一方、

【 0 0 4 0 】

【 数 2 】

$$\nu_z = \sqrt{n}$$

である。

- ・ 粒子振動と磁場成分、特に磁場誤差項との間の共鳴は、加速安定性および損失を決定する。

【 0 0 4 1 】

シンクロサイクロトロンにおいて、上述の弱収束磁場指数パラメータ n は以下のように定義される。

【 0 0 4 2 】

10

20

30

40

【数3】

$$n = -\frac{r}{B} \frac{dB}{dr}$$

ここで、 r は主軸 16 からのイオンの半径 (Q, M) であり、 B は当該半径における軸方向磁場の大きさである。弱収束磁場指数パラメータ n は、シンクロサイクロトロン内における全エネルギーまでのイオンの加速成功を可能にするために、加速チャンバ全体にわたって 0 から 1 の範囲であり (イオンが導入される場合、および半径がほぼゼロである場合には、主中心軸 16 に近接するチャンバの中心領域を例外とする可能性がある)、この場合、コイルによって生成される磁場が磁場指数を支配する。特に、平均軌跡の周囲でイオンを安定して振動させ続けるために、加速中に復元力が提供される。 $n > 0$ である場合、この軸方向復元力が存在することを示すことができ、これには、 $B > 0$ かつ $r > 0$ が真であることにより、 $dB/dr < 0$ となることが必要となる。シンクロサイクロトロンは、加速に必要な磁場指数と一致させるために、半径に伴って減少する場を有する。あるいは、磁場指数が既知である場合、図 2 に示す特徴の多くの位置および場所を含む電磁回路を、さらに詳細な軌道および場の計算によって最適解を提供することができるレベルの精度に特定することが可能である。そのような解を手に入れて、当該解をパラメータセット (B_0, E, Q, M , および V_0) にスケールリングすることができる。

10

【0043】

20

この点について、シンクロサイクロトロンの磁場内で回転するイオンの回転周波数は

$$= QB / M$$

であり、ここで、 h は、周波数の増大に伴う粒子質量の増大を表す相対論的因子である。シンクロサイクロトロン内におけるエネルギーの増大に伴うこの周波数減少は、円形粒子加速器のシンクロサイクロトロン加速モードの基礎であり、軸方向復元力のために必要な磁場指数変化に加えて、半径に伴う場のさらなる減少を生み出す。間隙全体にわたる電圧 V は、位相安定性を提供するために必要な最低電圧 V_{min} よりも大きく、 V_{min} において、粒子は、次の間隙を横断する際にさらなるエネルギーを獲得することを可能にするエネルギーを間隙に有する。また、シンクロサイクロトロン加速は位相安定性の原理に關与し、利用可能な加速電圧は、ほぼ常に、加速器の中心から外端付近の全エネルギーまでのイオン加速に必要な電圧を上回っていることを特徴とし得る。イオンの半径 r が減少すると、加速電場は増大するはずであり、このことは、磁場 B の増大に伴う加速電圧に対する実用限界があり得ることを示唆している。

30

【0044】

ある既知の、作動中の高磁場シンクロサイクロトロンパラメータセットについて、数ある中でもこれらの原理効果から決定され得る磁場指数 n は、加速用の磁場において半径方向変化を導き出すために使用され得る。この B 対 r のプロファイルは、データセット内の磁場を全エネルギー時に必要とされる実際の磁場値で割ることによって、また、この B 対 r のデータセット内の対応する半径値を全エネルギーに達した半径で割ることによって、さらにパラメータ化され得る。この正規化されたデータセットは、その後、さらに高い中心磁場 B_0 においてシンクロサイクロトロン加速解をスケールリングするために使用され、結果として加速器を全体的に小型化することができるが、これは、少なくとも以下のことも真である場合である：(a) 加速調和次数 h が一定であること (ここで調和次数とは、次式に示すように、場における加速電圧周波数 ω_{RF} とイオン回転周波数 ω_c との間の乗数をいう)

40

$$\omega_{RF} = h \omega_c$$

および (b) 周期当たりのエネルギー利得 E_t が、別の因子に対する E_t の比率が特に次式に示すように一定に保持されるように、制約されていることであって、

【0045】

50

【数4】

$$\frac{E_i}{QV_0 r^2 f(\gamma)} = \text{一定}$$

ここで、 $f(\gamma) = \frac{1}{\gamma^2} (1 - 0.25(\gamma^2 - 1))$ である。

【0046】

超伝導コイルを使用して高磁場シンクロサイクロトロンをさらに発達させるために、超伝導コイルの特性について以下でさらに検討する。超伝導コイルにおいては多数の異なる種類の超伝導体を使用することができ、エンジニアリング解にとって重要な多くの要因のうち、多くの場合、磁場、電流密度、および温度という3つの要因が超伝導体を特徴付けるために使用される。 B_{max} は、超伝導状態を、ある有用なエンジニアリング電流密度 J_c および動作温度 T_p に維持しながら、コイル内の超伝導ワイヤの超伝導フィラメント内に支持され得る最大磁場である。比較を目的として、多くの場合、超伝導シンクロサイクロトロン、特に本願において考察する高磁場超伝導シンクロサイクロトロンに提供されるもの等、磁石内の超伝導コイルに 4.5 K の動作温度 T_p を使用する。比較を目的として、 1000 A/mm^2 のエンジニアリング電流密度 J_c を合理的な代表例とする。動作温度および電流密度の実際の範囲は、これらの値よりも広範である。

【0047】

超伝導材料である NbTi は、超伝導磁石において使用され、 1000 A/mm^2 および 4.5 K において最大 7 テスラの場合レベルで動作されることができ、一方、Nb₃Sn は、 1000 A/mm^2 および 4.5 K において最大約 11 テスラの場合レベルで動作されることができる。しかしながら、過冷却として公知のプロセスによって超伝導磁石内の温度を 2 K に維持することも可能であり、この場合、NbTi の性能は、2 K および 1000 A/mm^2 において約 11 テスラの動作レベルに到達し、一方、Nb₃Sn は、2 K および 1000 A/mm^2 において約 15 テスラに到達することができるであろう。実際には、超伝導安定性のために場限界で動作するように磁石を設計することはなく、また、超伝導コイルにおける場レベルは、極間隙における場レベルよりも高くてもよく、そのため、実際の動作磁場レベルは低いものとなるであろう。さらに、これら2つの伝導体ファミリーの特定メンバ間の詳細な差異は、より低い電流密度で動作するように、この範囲を広げるであろう。超伝導素子のこれらの既知の特性の近似範囲は、先に提示した軌道スケールリング則に加えて、小型の高磁場超伝導シンクロサイクロトロンにおける望ましい動作場レベルのために、特定の超伝導ワイヤおよびコイル技術を選択することを可能にする。特に、NbTi および Nb₃Sn 伝導体で作られ、4.5 K で動作する超伝導コイルは、シンクロサイクロトロン内のより低い場から 10 テスラを超過する場までの動作場レベル範囲に及ぶ。動作温度を 2 K までさらに減少させると、当該範囲は少なくとも 14 テスラの動作磁場レベルまで拡張する。

【0048】

超伝導コイルはまた、巻き線における磁力のレベル、および、何らかの理由により巻き線の一部が全動作電流において常伝導となってしまった場合に、エネルギーを迅速に除去することの望ましさも特徴とする。エネルギーの除去は、磁石クエンチとして知られている。超伝導シンクロサイクロトロンのスプリットコイル対 12 および 14 における力およびクエンチ保護に関するいくつかの要因があり、これらは、スケールされた高磁場超伝導シンクロサイクロトロンが選択された伝導体型を使用して正常に動作するために取り組まれているものである。図 4 に示すように、コイルセットは、上部超伝導コイル 12 および下部超伝導コイル 14 を有するスプリットコイル対を含む。上部 12 および下部 14 超伝導コイルは、交流超伝導体および絶縁素子と共に軸方向に巻かれる。異なる組成および性質を有するいくつかの種類または等級の超伝導体を使用することができる。

【0049】

10

20

30

40

50

上部超伝導コイル 1 2 内の表面 1 6 8 と下部超伝導コイル 1 4 内の表面 1 7 0 は、伝導体をより優れたコイル設計と一致させるために伝導体等級が変化する境界を、図式的に示している。クエンチ保護を補助する、または巻き線の構造強度を増大させる等の特定の目的で、これらの、またはその他の場所に、さらなる構造体を導入してもよい。したがって、各超伝導コイル 1 2 および 1 4 は、境界 1 6 8 および 1 7 0 によって隔てられた複数のセグメントを有し得る。図 4 には 3 つのセグメントが示されているが、これは一実施形態にすぎず、使用するセグメントはこれより多くても少なくてもよい。

【 0 0 5 0 】

上部および下部のコイル 1 2 および 1 4 は、ポピン 2 0 と称される低温コイルの機械的閉じ込め構造体内にある。ポピン 2 0 は、上部および下部のコイル 1 2 および 1 4 が半径方向に外向きの大きい力だけでなく大きい引力による負荷を有する場合、コイル 1 2 および 1 4 を半径方向および軸方向の両方に支持し、収納している。ポピン 2 0 は、それらの各表面 1 1 4 および 1 1 6 を介して、コイル 1 2 および 1 4 に軸方向支持を提供する。ポピン 2 0 内に、およびそれを介して、加速チャンバ 4 6 へのアクセスを提供する複数の半径方向通路 1 7 2 が画定される。また、コイル/ポピンアセンブリを適切な場所に保持するための半径方向・軸方向リンクを提供するように、ポピン 2 0 上に複数のアタッチメント構造体（図示せず）を設けてもよい。

【 0 0 5 1 】

上部超伝導コイル 1 2 の点 1 5 6 および下部超伝導コイル 1 4 の点 1 5 8 は、最も高い磁場の近似領域を示し、この場レベルは、上記で考察したように、選ばれた超伝導体のための設計点を設定する。また、上部超伝導コイル 1 2 内の交差領域 1 6 4 および下部超伝導コイル 1 4 内の交差領域 1 6 6 は磁場反転の領域を示し、これらの場合において、巻き線にかかる半径方向力は、内側に向けられ、緩和される。領域 1 6 0 および 1 6 2 は、低磁場または略ゼロの全体磁場レベルの地帯を示し、クエンチに対する最大の抵抗を呈する。

【 0 0 5 2 】

小型の高磁場超伝導サイクロトロンは、位相安定加速のための要素を含み、これらを図 5 ~ 8 に示す。図 5 および 6 は、図 1 の 9 . 2 テスラ解について、ビームチャンバ 1 7 6 および共振器 1 7 4 を有する一種のビーム加速構造体の詳細なエンジニアリングレイアウトを提供し、ここでチャンバ 1 7 6 は極間隙空間内に位置している。図 5 の立面図は、イオンを加速するために使用されるディー 4 8 のうちの 1 つのみを示し、一方、側面図は、このディー 4 8 が、加速中にビームを通過させるために中央面の上下で分裂することを示す。ディー 4 8 およびイオンは、真空下における体積であり、ビームチャンバ基板 1 7 8 を含むビームチャンバ 1 7 6 によって画定される。加速間隙画定開口 1 8 0 は、電気接地面を確立する。イオンは、ディー 4 8 と加速間隙接地面画定開口 1 8 0 との間の加速間隙 1 8 2 全体にわたる電場によって加速される。

【 0 0 5 3 】

間隙 1 8 2 全体にわたって望ましい高磁場を確立するために、ディー 4 8 は、ディー - 共振器コネクタ 1 8 4 を介して共振器内部伝導体 1 8 6 および共振器外部伝導体 1 8 8 と接続される。外部共振器伝導体 1 8 8 は、高磁場シンクロサイクロトロンのクライオスタット 2 0 0（図 9 に示す）と接続され、当該接続によって真空境界が維持される。共振器周波数は、連結ポート 1 9 2 を通る共振器外部伝導体リターンヨーク 1 9 0 を介して加速ディー 4 8 ならびに内部および外部伝導体 1 8 6 および 1 9 8 に接続された R F 回転キャパシタ（図示せず）によって変動する。R F 伝送線連結ポート 1 9 4 を介して、R F 共振回路に動力が配送される。

【 0 0 5 4 】

別の実施形態では、図 9 において図式的に示すように、2 つのディーと軸方向 R F 共振器素子を有する代替的な構造体が、小型の高磁場超伝導シンクロサイクロトロンに組み込まれる。そのような 2 ディーシステムは、加速度増大または電圧 V_0 の低減を可能にし得る。したがって、2 つのディー 4 8 および 4 9 が使用され、ディー 4 8 および 4 9 は、中

10

20

30

40

50

央面の向かい合う側面上で2つに分割され、上部軸方向共振器195および196ならびに下部軸方向共振器197および198によって励振され、これらは(図2に示す通路154を介する半径方向の動力送給に加えて)外部RF電源によって励振される。図9はまた、コイルクライオスタット200がどのようにして強磁性ヨーク構造体36に適合されるかを示している。

【0055】

粒子加速用の磁石構造体10の、より完全かつ詳細な図示を図10および11に示す。磁石構造体10は、例えば、小型のシンクロサイクロトロン(例えば、米国特許第4,641,057号において開示されるシンクロサイクロトロンの特徴を別の手法で共有するシンクロサイクロトロン)において、等時性サイクロトロンにおいて、および、その内部でイオン(陽子、重陽子、アルファ粒子、およびその他のイオン等)が加速され得るその他の種類のサイクロトロン加速器において、使用され得る。

【0056】

より広範な磁気構造体内において、高エネルギーの磁場は、円形コイル12および14の対を含むコールドマス構造体21によって生成される。図12に示すように、円形コイル12および14の対は、コイル12および14と銅製熱シールド78との間の機械的密着によって真空中に維持された、各銅製熱シールド78の内側に装着される。それぞれの銅製熱シールド78内には、動作中に各コイル12/14に作用する極めて高い周方向の引張力に対抗するために、半径方向に内向きの力を印加する加圧袋80も装着されている。コイル12および14は、イオンが加速され得る加速面18の上下等距離にある中心軸16の周囲に、対称的に配置される。コイル12および14は、RF加速システムがその間に延在して加速チャンバ46へ入ることを可能にするために十分な距離だけ隔てられている。各コイル12/14は、概して4~6Kの範囲の意図された動作温度において超伝導であるが、2K未満でも動作され得る伝導体材料の連続経路を含み、この場合、さらなる超伝導性能およびマージンが利用可能である。各コイルの半径は、約17.25インチ(約43.8cm)である。

【0057】

図13に示すように、コイル12および14は、例えば合計200万~300万アンペアターンの電流搬送容量を提供するために、超伝導体ケーブル、または、0.6mmの直径を有し、巻かれた個々のケーブル撚り線82を有するケーブル・イン・チャンネル伝導体を備える。一実施形態において、各撚り線82が2,000アンペアの超伝導電流搬送容量を有する場合、コイル内に300万アンペアターンの容量を提供するために、コイル内に1,500回巻きの撚り線が設けられる。概して、コイルは、超伝導撚り線の臨界電流搬送容量を上回ることなく、望ましい磁場レベルに必要なアンペアターン数を生じさせるために必要とされるだけの巻き線を有するように設計されることになる。超伝導材料は、ニオブチタン(NbTi)、ニオブスズ(Nb₃Sn)、またはニオブアルミニウム(Nb₃Al)等の低温超伝導体であってもよく、特定の実施形態において、超伝導材料は、第2種超伝導体、特に、A15型結晶構造を有するNb₃Snである。Ba₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈、Ba₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀、またはYBa₂Cu₃O_{7-x}等の高温超伝導体を使用してもよい。

【0058】

ケーブル撚り線82は、複合導体86を形成するために、U型銅チャンネル84にはんだ付けされる。銅チャンネル84は、機械的支持と、クエンチ中の熱安定性と、超伝導材料が正常である(すなわち、超伝導でない)場合の電流用の伝導経路とを提供する。続いて複合導体86はガラス繊維で覆われ、その後、外向きに重ねて巻かれる。磁石がクエンチされる際に急速加熱を提供するため、また、クエンチが発生した後にコイルの半径方向断面全体にわたって温度平衡を提供するために、例えばステンレス鋼で形成されたストリップヒータ88を、複合導体86の巻き層の間に挿入して、コイルを損傷し得る熱的および機械的応力を最小化することもできる。巻いた後、真空が印加され、巻き複合導体構造にエポキシを含浸させて、最終コイル構造内に繊維/エポキシ複合フィルタ90を形成する。

巻き複合導体 8 6 が埋め込まれた、得られたエポキシ - ガラス複合体は、電気絶縁性および機械的剛性を提供する。エポキシ含浸ガラス繊維で形成された巻き絶縁層 9 6 は、銅製熱シールド 7 8 の内部を裏打ちし、コイル 1 2 を包囲する。

【 0 0 5 9 】

サイクロトロンにおいて使用するために Nb_3Sn が構造化されている実施形態において、コイルは、スズメッキ線の巻き撚り線をニオブ粉末の母材に入れることによって形成される。その後、巻き撚り線および母材を、約 6 5 0 の温度になるまで 2 0 0 時間加熱し、スズメッキ線をニオブ母材と反応させ、それによって Nb_3Sn を形成する。そのような熱処理の後、ケーブル中の各 Nb_3Sn 撚り線は、超伝導状態を維持するために、動作磁場および動作温度において十分な電流マージンを有する全電流の一部を搬送しなくてはならない。銅チャンネル断面およびエポキシ複合母材の仕様は、高磁場コイルが、そのような小型のコイルにおいて発生するより大きい機械的応力下において、その超伝導状態を維持することを可能にするものである。このピーク応力移行の改善は、生成される磁場を増大させるためにコイルがより高い電流密度で動作される場合、高度に有利なものにもなり、これには超伝導コイルに作用するより大きい力を伴う。 Nb_3Sn 伝導体は脆性であり、全動作中の応力状態を適正に制限しなければ、損傷を受け、いくらかの超伝導能力を喪失する可能性がある。ワインド・アンド・リアクト法に続く、巻き線の周囲におけるエポキシ複合体の機械的構造の形成は、超伝導体が使用される、または使用され得るその他の用途においてこれらの Nb_3Sn コイルが使用されることを可能にするが、先の実施形態における標準的な Nb_3Sn コイルの脆性により、通常であれば Nb_3Sn は適さない場合がある。

【 0 0 6 0 】

コイル 1 2 および 1 4 が中に収納された銅製シールドは、ステンレス鋼またはオーステナイト系ニッケル - クロム - 鉄合金 (Special Metals Corporation (Huntington, West Virginia, USA) から INCONEL 6 2 5 として市販されている) 等の高力合金で形成されたボビン 2 0 内に装着される。ボビン 2 0 は、コイル 1 2 と 1 4 との間に介在するが、そうでない場合、コイル 1 2 および 1 4 の外側にある。ボビン 2 0 の頂部分および底部分 (図 1 2 の配向による) は、コイルの外側にあり、それぞれコイル 1 2 / 1 4 の厚さにほぼ等しい厚さ (図 1 2 の配向により、水平に計測) を有する。コイル 1 2 および 1 4 ならびにボビン 2 0 を含むコールドマス構造体 2 1 は、クライオスタットと称される絶縁および真空のステンレス鋼またはアルミニウムの外殻 2 3 内に入れられ、これが鉄製の極およびヨーク 3 6 の内側に装着され得る。コールドマス構造体 2 1 は、イオンを加速するための加速チャンバ 4 6 (図 1 1 参照) 用の空間および加速チャンバ 4 6 を超えて延在する中心軸 1 6 のセグメントの境界を定める (すなわち、少なくとも部分的に画定する)。

【 0 0 6 1 】

図 1 1 に示すように、磁石構造体 1 0 は、温度上昇によって「正常」になった際にコイル 1 2 / 1 4 をクエンチするための、各コイル 1 2 / 1 4 を包囲する (例えば、コイル周囲の螺旋、そのごく一部を図 1 1 に示す) 導電ワイヤ 2 4 (例えば、ケーブルの形態でも含む)。コイル 1 2 / 1 4 の一部はもはや超伝導ではないことを意味すると考えられるコイル 1 2 / 1 4 のいずれかにおける電気抵抗の増大を監視するために、電圧または電流センサもコイル 1 2 および 1 4 に連結される。

【 0 0 6 2 】

図 1 0 に示すように、Gifford - McMahon 冷凍サイクルにおいて圧縮ヘリウムを利用することができる、またはパルスチューブクライオクーラ設計であってもよいクライオクーラ 2 6 は、コールドマス構造体 2 1 と熱的に結合している。結合は、コイル 1 2 / 1 4 と接触する低温超伝導体 (例えば、 $NbTi$) 電流リード線の形態であってもよい。クライオクーラ 2 6 は、超伝導となる温度まで各コイル 1 2 / 1 4 を冷却することができる。したがって、各コイル 1 2 / 1 4 は、動作中、乾燥状態に維持される (すなわち、液体ヘリウムまたはその他の液体冷媒に浸漬されない) ことができ、コールドマスの

冷却のためにも、超伝導コイル 12 / 14 の動作のためにも、コールドマス構造体 21 の中またはその周囲に冷却液を提供する必要がない。

【0063】

クライオクーラ 26 と同じまたは同様の設計のものであってよい、第 2 のクライオクーラ対 27 は、電流リード線 37 および 58 によってコイル 12 および 14 と連結される。高温電流リード線 37 は、 $Ba_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$ または $Ba_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 等の高温超伝導体で形成され、約 80 K の温度であるクライオクーラ 27 の第 1 の段の端にあるコールドヘッド 33 の傍の一端において、および、約 4.5 K の温度であるクライオクーラ 27 の第 2 の段の端にあるコールドヘッド 35 の傍の他端において、冷却される。高温電流リード線 37 は、電圧源とも伝導的に連結している。低温電流リード線 58 は、電流フロー用の経路を提供するためにより高温の電流リード線 37 と連結され、また、低温電流リード線 58 を約 4.5 K の温度まで冷却するために、クライオクーラ 27 の第 2 の段の端にあるコールドヘッド 35 とも連結される。低温電流リード線 58 のそれぞれは、各コイル 12 / 14 に付着されたワイヤ 92 も含み、同じく低温超伝導体で形成された第 3 のワイヤ 94 は、2 つのコイル 12 および 14 を直列に連結する。ワイヤのそれぞれは、ボビン 20 に重着されてもよい。したがって、電流は、電圧源を所有する外部回路から、第 1 の高温電流リード線 37 を介して、第 1 の低温電流リード線 58 およびコイル 12 内へ流れることができ、続いて電流は、コイル 12 を通って流れ、その後、コイル 12 と 14 を接合しているワイヤを通して出ることができる。続いて電流はコイル 14 を通って流れ、第 2 の低温電流リード線 58 のワイヤを通して出て、低温電流リード線 58 を通って上り、その後第 2 の高温電流リード線 37 を通り、電圧源へ戻る。

10

20

【0064】

クライオクーラ 29 および 31 は、隔離された処置室内、または可動プラットフォームにおいて等、極低温冷却液の源から離れた磁石構造体の動作を可能にする。クライオクーラ 26 および 27 の対は、適切な機能を有する各対の 1 つのクライオクーラのみによって、磁石構造体の動作を可能にする。

【0065】

少なくとも 1 つの真空ポンプ（図示せず）が、RF 加速器電極用の電流リード線も挿入された共振器 28 を介して加速チャンバ 46 と連結される。加速チャンバ 46 内における真空の作成を可能にするために、加速チャンバ 46 のそれ以外は密閉される。

30

【0066】

半径方向の引張リンク 30、32、および 34 は、ボビン 20 を半径方向に外向きの引張力下に設置し、コイル 12 および 14 が中心軸 16 を中心に保つ（すなわち、実質的に対称的である）ように、半径方向の引張リンク 30、32、および 34 が、複数の点においてボビン 20 に対して外向きの周方向力を提供することができる構成で、コイル 12 および 14 ならびにボビン 20 と連結される。そのようなものとして、引張リンク 30、32、および 34 は、磁気偏心力に対して半径方向支持を提供し、それにより、片側で鉄に接近するコールドマスは、飛躍的な力の増大を経験し、さらに鉄の近くへ動く。半径方向の引張リンク 30、32、および 34 は、線形セグメントによって接合された丸い先端を（例えば、従来のレーストラックまたはランニングトラックの近似形状で）有する 2 つ以上の弾性引張バンド 64 および 70 を備え、直円断面を有する。バンドは、例えばエポキシを含浸させた螺旋巻きガラスまたはカーボンテープで形成され、高温の外枠から低温のコイル 12 および 14 への熱伝達を最小化するように設計される。低温のバンド 64 は、支持杭 66 と支持杭 68 との間に延在する。ボビン 20 と連結された最も低温の支持杭 66 は約 4.5 K の温度であり、一方、中間杭 68 は約 80 K の温度である。より高温のバンド 70 は、中間杭 68 と高温杭 72 との間に延在し、約 300 K のほぼ周囲温度である。引張リンク 30、32、および 34 のいずれかにさらなる引張を印加して、種々の偏心力がコイル 12 および 14 に作用する際にセンタリングを維持するために、高温の杭 72 に外向きの力を印加してもよい。杭 66、68、および 72 は、ステンレス鋼で形成されてもよい。

40

50

【 0 0 6 7 】

同じく、コイル 1 2 および 1 4 の位置を中央面 1 8 の周囲に対称的に維持するために、同様の引張リンクを、垂直軸（図 1 0 および 1 2 の配向による）に沿ったコイル 1 2 および 1 4 に付着させて、軸方向の磁気偏心力に対抗してもよい。動作中、コイル 1 2 および 1 4 は互いに強く引き寄せあうが、コイル 1 2 と 1 4 との間のボビン 2 0 セクションはそれらの引力に拮抗することになる。

【 0 0 6 8 】

半径方向および軸方向の引張リンクのセットは、必要とされる調心力を提供することに加え、重力に対してコイル 1 2 および 1 4 ならびにボビン 2 0 の質量を支持する。引張リンクは、固定標的照射場所の周囲の室内において陽子ビームを動かすことを可能にするため、ガントリー、プラットフォーム、または自動車に磁石構造体を装着する等、規定速度における磁石構造体全体の円滑または段階的な 3 次元の並進または回転運動を可能にするようにサイズ決定されてもよい。重力支持および運動要求はいずれも、磁気偏心力を超過しない引張荷重である。引張リンクは、多くの運動サイクルにわたる反復運動および長年の運動用にサイズ決定されてもよい。

【 0 0 6 9 】

低炭素鋼で形成された磁石ヨーク 3 6 は、コイル 1 2 および 1 4 ならびにクライオスタット 2 3 を取り囲む。純鉄は弱過ぎる上に、低すぎる弾性係数を所有する場合があるため、望ましい磁気レベルを保ちながら、十分な強度を提供するため、または堅さを和らげるために、鉄に十分な量の炭素およびその他の要素をドーピングしてもよい。ヨーク 3 6 は、コイル 1 2 および 1 4 ならびにクライオスタット 2 3 によって境界を定められる中心軸 1 6 の同じセグメントの境界を定める。ヨーク 3 6 の外表面における半径（中心軸から計測）は、約 3 5 インチ（約 8 9 c m）以下であってもよい。

【 0 0 7 0 】

ヨーク 3 6 は、極 3 8 と 4 0 との間に加速チャンバ 4 6 を超えて極間隙 4 7 を画定する先細になった内面 4 2 および 4 4 を有する、1 対の極 3 8 および 4 0 を含む。それらの先細になった内面 4 2 および 4 4 のプロファイルは、コイル 1 2 および 1 4 の位置の関数である。先細になった内面 4 2 および 4 4 は、極間隙 4 7（図 1 0 の基準線によって示されるように計測）が、中心軸 1 6 からの距離が増大するにつれて、向かい合う表面 4 2 間に画定された内段上で拡張し、中心軸 1 6 からの距離がさらに増大するにつれて、向かい合う表面 4 4 間に画定された外段上で減少するように形作られる。内段は、例えば陽子加速用のシンクロサイクロトロンにおいて使用される場合、イオン（例えば、陽子）加速用の正しい弱収束要件を確立し、一方、外段は、半径に対するエネルギー利得を増大させることにより、極直径を低減させるように構成され、それにより、イオンが加速チャンバ 4 6 の周辺部に接近した際の、シンクロサイクロトロンからのイオンの抽出を容易にする。

【 0 0 7 1 】

説明したような極プロファイルは、いくつかの重要な加速機能、すなわち、機械の中心における低エネルギーでのイオン誘導、安定した加速経路への捕獲、加速、軸方向および半径方向の収束、ビーム品質、ビーム損失の最小化、最終的に望ましいエネルギーおよび強度の達成、ならびに、抽出のための最終ビーム場所の位置決め、を有する。特に、シンクロサイクロトロンにおいて、弱収束および加速位相安定性の同時達成が実現される。この磁石構造体において実現される高磁場において、第 1 の段上における極間隙の拡張は十分な弱収束および位相安定性を提供し、外段上における間隙の急速な閉鎖は、抽出チャンネルへの抽出用の極端部付近に全エネルギービームを適切に位置付ける一方で、強力な超伝導コイルの悪影響に対して弱収束を維持することの原因となる。実施形態において、磁石により生成される磁場が増大される場合、内段上において半径を増大させるにつれて間隙開口部が増大する速度が大きくなり、一方、間隙は、外段上で閉鎖されて分離距離がより狭くなる。極における鉄は、2 テスラを超える極強度で完全に磁氣的に飽和され、この同時目標のセットは、極の先細になった表面の代わりに、加速チャンバ内のさらなる超伝導コイル 2 0 6（例えば、少なくとも 4 . 5 K の温度で超伝導となる）の入れ子になったセ

10

20

30

40

50

ットで代用し、それらの入れ子になったセット内に、図 1 6 に示すように極の磁場の寄与を加速場全体と一致させるように最適化された電流を有することにより、遂行され得る。

【 0 0 7 2 】

これらの半径方向に分布したコイル 2 0 6 は、ヨーク 2 6 内に埋め込まれてもよいし、ヨーク 2 6 に装着（例えば、ボルト留め）されてもよい。これらのさらなる超伝導コイル 2 0 6 のうちの少なくとも 1 つは、2 つの 1 次超伝導コイル 1 2 および 1 4 と逆の場所に磁場を生成する。本実施形態においては、ヨーク 3 6 も冷却される（例えば、1 つ以上のクライオクーラによって）。図示していないが、半径方向の中央面通路 1 5 4 を介して絶縁構造が提供されてもよく、この絶縁構造内に収納される加速チャンバは、温暖な温度に維持され得るような加速チャンバである。1 次コイル 1 2 および 1 4 に電流が渡される方向とは逆の方向で、さらなる磁石コイル 2 0 6 に電流を通すことにより、内部コイル 2 0 6 内に逆磁場が生成される。加速チャンバ内における更なる有効コイル 2 0 6 の使用は、加速面 1 8 内の場が 1 2 テスラよりも大きい状況、また、弱収束および位相安定性を維持しながら、半径に伴う場の減少を維持するために、それに応じてより多くの場補正が必要とされる状況において、特に有利なものとなり得る。より高磁場の磁石構造体は、より小さい外半径を有することになる。例えば、中央加速面 1 8 内に 1 4 テスラの磁場を生じさせるための磁石構造体を、1 フィート余り（すなわち、3 0 c m 余り）の外半径を有するヨークで構築することができる。

10

【 0 0 7 3 】

その他の実施形態において、ヨーク 3 6 を省略してもよく、場は完全に超伝導コイル 1 2、1 4、および 2 0 6 によって生成されることができる。別の実施形態において、ヨーク 3 6 中の鉄は、ガドリニウム等、特に高い飽和磁性（例えば、最大約 3 テスラ）を有する別の強力な強磁性体と置換される。

20

【 0 0 7 4 】

鉄ヨークは、伝導金属で形成される無線周波数（R F）加速器電極 4 8（「ディー」としても知られる）を含む共振器構造 1 7 4 の挿入のための十分なクリアランスを提供する。電極 4 8 は、ヨーク 3 6 の側面を通して延在し、クライオスタット 2 3 およびコイル 1 2 と 1 4 との間を通過する、共振器構造 1 7 4 の一部である。加速器電極 4 8 は、（米国特許第 4, 6 4 1, 0 5 7 号において記載および図示されているように）加速チャンバ 4 6 の内側の加速面 1 8 に対し平行に、かつその上下に配向された、1 対の平坦な半円平行板を含む。電極 4 8 は、加速チャンバ 4 6 内の拡張する軌道（螺旋）経路においてイオン源 5 0 から放出されたイオンを加速するために、振動電場を生成する R F 電圧源（図示せず）と連結される。また、中心軸 1 6 の平面（すなわち、図 1 0 の配向で中心軸と交差し、当該ページから直角に延在する平面）内で配向され、粒子用の加速面を収容するためにその中に画定されたスロットを有する平面シートの形態で、ダミーディーを設けてもよい。あるいは、ダミーディーは、電極 4 8 と同一の構成を有してもよいが、当該ダミーディーは、電圧源とは異なる電気接地と連結されるであろう。

30

【 0 0 7 5 】

一体型磁気シールド 5 2 は、磁石構造体 1 0 のその他のコンポーネントの境界を定める。一体型磁気シールド 5 2 は、低炭素鋼の薄いシート（例えば、2 c m の厚さを有する）の形態であってもよい。図 1 0 に示すように、図 1 0 の側面に沿ってシートが 3 枚積み重ねられていることから明らかであるが、影響を受けやすいエリアのさらなる防護を提供するために、選択された場所に複数のシートを積み重ねてもよい。あるいは、シールド 5 2 は、図 1 4 および 1 5 に示すように、蛇行形状（例えば、折り畳み時のアコーディオンの構造に類似したもの）を有してもよく、コイル 1 2 および 1 4 によって、ならびにヨーク 3 6 によって生成される磁場の大部分が、複数の場所およびシールド 5 2 の局所配向に対して複数の角度において一体型磁気シールド 5 2 を通過する必要があるように構成される。図 1 4 の実施形態において、一体型磁気シールド 5 2 は、その配向が中心軸 1 6 からの半径方向のベクトル 5 6 に対して垂直と平行との間で次第に前後にシフトするプロファイルを有する。各半径方向のベクトル 5 6 は、2 つ以上の異なる場所 - - ほぼ垂直な角度お

40

50

よびほぼ正接の角度を含む - - においてシールド 5 2 と交差するであろう。ベクトル 5 6 が一体型磁気シールド 5 2 とほぼ垂直に交差する第 1 の交点 7 4 においては、法線磁場成分が相殺され、一方、ベクトル 5 6 が一体型磁気シールド 5 2 とほぼ正接に交差する第 2 の交点においては、接線磁場成分が相殺される。

【 0 0 7 6 】

一体型磁気シールド 5 2 は、加速チャンバ 4 6 の内部に 8 テスラ以上の磁場を生成するために、超伝導コイル 1 2 および 1 4 に電圧が印加される際、ヨーク 3 6 の外側で生成される 1 , 0 0 0 ガウスの磁束密度の輪郭の外側に配置されるように、磁石ヨーク 3 6 の外表面から離間して装着される。したがって、一体型磁気シールド 5 2 は、場によって完全に磁化されないように、ヨーク 3 6 から十分遠くに配置され、通常であれば磁石構造体 1 0 から放出される非近接場を抑制する役割を果たす。

10

【 0 0 7 7 】

クライオクーラ 2 6 および 2 7 のヘッド 2 9 および 3 1 は、磁場からヘッド 2 9 および 3 1 を防護するために、一体型磁気シールド 5 2 の外側に配置される（ヘッド 2 9 および 3 1 における場限界により、クライオクーラの操作性を損なう場合がある）。したがって、一体型磁気シールド 5 2 は、その中に各ポートを画定し、それを通してクライオクーラ 2 6 および 2 7 を挿入することができる。

【 0 0 7 8 】

上述の磁石構造体 1 0 の、イオンを加速するための磁場を生成する動作について、以下のページで説明する。

20

【 0 0 7 9 】

磁石構造体 1 0 が動作中の場合、それぞれの温度をその臨界温度（超伝導性を呈する温度）を下回るまで降下させるように、超伝導コイル 1 2 および 1 4 から熱を抽出するためにクライオクーラ 2 6 が使用される。低温超伝導体で形成されたコイルの温度は、約 4 . 5 K まで降下する。

【 0 0 8 0 】

コイルが 4 . 5 K である場合、加速チャンバ 4 6 内において少なくとも 8 テスラの磁場を生成するために、電流リード線 5 8 を介して各コイル 1 2 / 1 4 に電圧（例えば、コイル中に 1 , 5 0 0 本の巻き線を有する上述の実施形態において、電流リード線を介して 2 , 0 0 0 A の電流を生成するために十分なもの）が印加される。例えば Nb₃Sn を使用する特定の実施形態において、加速チャンバ 4 6 内に少なくとも約 9 テスラの磁場を生成するために、コイル 1 2 および 1 4 に電圧が印加される。さらに、上記で考察したように、クライオクーラを使用してコイル温度を 2 K までさらに降下させることにより、場は概してさらに 2 テスラ増大され得る。磁場は、完全に磁化された鉄製の極 3 8 および 4 0 からの約 2 テスラの寄与を含み、磁場の残りは、コイル 1 2 および 1 4 によって生じる。

30

【 0 0 8 1 】

この磁石構造体は、イオン加速に十分な磁場を生成する役割を果たす。イオン（例えば、陽子）のパルスは、イオン源 5 0（例えば、米国特許第 4 , 6 4 1 , 0 5 7 号に記載および図示されているイオン源）から放出され得る。例えば、カソードから水素ガス中へ電子を放電させるためにカソードに電圧パルスを印加することによって自由陽子を生成することができ、電子が水素分子と衝突した際に陽子が放出される。

40

【 0 0 8 2 】

本実施形態において、RF 加速器電極 4 8 は、基板全体にわたって 2 0 , 0 0 0 ボルトの電圧差を生成する。RF 加速器電極 4 8 によって生成される電場は、加速されるイオンのサイクロトロン軌道周波数と一致する周波数を有する。RF 加速器電極 4 8 によって生成される場は、イオンが中心軸 1 6 の最も近くにある場合に 1 4 0 MHz の周波数で振動し、周波数は、イオンが中心軸 1 6 から最も遠く、加速チャンバ 4 6 の周辺部の最も近くにある場合に、1 0 0 MHz まで低く減少する。電極 4 8 における交流周波数がイオンを交互に引き寄せたり跳ね返したりするため、陽子が加速されるとその質量の増大を埋め合わせるために周波数が降下する。それによりイオンが軌道内で加速されるため、イオンは

50

速度を上げ、外向きに螺旋を描く。

【0083】

加速されたイオンが加速チャンバ46内の外側半径方向の軌道に到達すると、加速チャンバ46の周辺部の周囲に配置された磁石によって、ヨーク36、その後、一体型磁気シールド52内の間隙を通過して加速チャンバ46から例えば外部標的に向かって延在する線形ビーム抽出通路60へそれらのイオンを磁氣的に案内することにより、イオンを(パルスビームの形態で)加速チャンバ46から引き出すことができる。半径方向の引張りリンク30、32、および34は、コールドマス構造体21に半径方向外向きの周方向力を課し、加速プロセス全体を通してその位置を維持するために有効にされる。

【0084】

一体型磁気シールド52は、磁石構造体10の方への、例えばペン、ペーパークリップ、およびその他の金属性の物体の引力に付随する外的危険を低減させるように、コイル12および14ならびに極38および40によって生成される磁場を収納するため、一体型磁気シールド52を用いないということが発生するであろう。法線磁場および接線磁場はいずれも磁石構造体10によって生成され、それぞれを収納するための最適なシールド配向は90°異なっているため、種々の角度における磁力線と一体型磁気シールド52との間の相互関係は、高度に有利である。このシールド52は、シールド52を介してヨーク36から送出される磁場の大きさを、0.00002テスラ未満に限定することができる。

【0085】

超伝導コイル12/14の局所部分がもはや超伝導ではないことを意味する、コイル12/14を通る電圧の増大または電流の降下を検出されると、コイル12/14を包囲するクエンチングワイヤ24に十分な電圧が印加される。この電圧は、ワイヤ24を介して電流を生成し、それによってコイル12/14中の個々の伝導体にさらなる磁場を生成し、それらを完全に非超伝導(すなわち、「正常」)にする。このアプローチは、動作中、各超伝導コイル12/14中の内部磁場が、その内面62において極めて高く(例えば、11テスラ)なり、ある内部点においてゼロまで降下するという、認識されている問題を解決するものである。クエンチが発生する場合、高磁場の場所で発生する可能性が高く、一方、低磁場の場所は長期間冷たく超伝導のままであり得る。このクエンチは、常伝導であるコイル12/14の超伝導体の部分において熱を生成し、その結果、端部はその温度が上昇するにつれて超伝導ではなくなり、一方、コイル内の中心領域は冷たく超伝導のままとなる。結果として生じる示差熱は、通常であれば、コイル内において示差熱収縮による破壊的応力を引き起こすであろう。この誘導クエンチの実践は、この示差を防止または限定し、それにより、内部応力によって破壊されることなくさらに高い磁場を生成するためにコイル12および14が使用されることを可能にすることを意図するものである。あるいは、電流は、4.5Kを優に上回るまでヒータストリップ温度を上昇させながらヒータストリップ88を通過することにより、超伝導体を局所的に加熱して、クエンチ中の内部温度示差を最小化することができる。

【0086】

上述の装置を組み込んだサイクロトロンは、ヒトのための陽子線照射療法、エッチング(例えば、マイクロホール、フィルタ、および集積回路)、材料研究のための材料の放射化、トライボロジー、基本科学調査、安全性(例えば、標的貨物に加速陽子を照射しながら陽子散乱を監視すること)、医薬および産業のための医療用アイソトープおよびトレーサの製造、ナノテクノロジー、高度な生物学を含む多種多様な用途のために、また、小型源からの高エネルギー粒子の点状の(すなわち、空間分布が小さい)ビームの生成が有用となり得る多種多様なその他の用途において、利用され得る。

【0087】

本発明の実施形態を説明する上で、明確にするために特定の専門用語を使用している。説明を目的として、各特定の用語は、同様の目的を遂行するために同様の様式で動作するすべての技術的および機能的な均等物を少なくとも含むことを意図している。また、本発

10

20

30

40

50

明の特定の実施形態が複数のシステム要素または方法ステップを含むいくつかの場合において、それらの要素またはステップは、単一の要素またはステップと置換されてもよく、同様に、単一の要素またはステップは、同じ目的を果たす複数の要素またはステップと置換されてもよい。さらに、本発明の実施形態の種々の特性を表すパラメータが本願において特定されている場合、それらのパラメータは、別段の定めがない限り、本発明の範囲内において、1/20、1/10、1/5、1/3、1/2等、または、その丸めた近似値分、上下に調整され得る。さらに、その特定の実施形態を参照して本発明を示し説明しているが、当業者であれば、本発明の範囲を逸脱することなく形態および詳細における種々の代用および変更がなされ得ること、またさらに、その他の態様、機能、および利点も本発明の範囲内であることを理解するであろう。本出願の全体を通して引用した特許および特許出願を含むすべての参考文献の内容は、参照することにより、その全体が本願に援用される。それらの参考文献の適切なコンポーネントおよび方法が、本発明およびその実施形態のために選択され得る。またさらに、「背景」の節で同定したコンポーネントおよび方法は、本開示に不可欠なものであり、本発明の範囲内において、本開示の別の箇所に記載したコンポーネントおよび方法と組み合わせて、またはその代用として使用され得る。

10

【図面の簡単な説明】

【0088】

【図1】図1は、コイル/クライオスタットアセンブリを除く高磁場シンクロサイクロトロンの基本構造を示す断面斜視図である。

【図2】図2は、高磁場シンクロサイクロトロン用の強磁性体および磁石コイルの断面図である。

20

【図3】図3は、各極翼から延在し、共通の配向中心軸を共有し、その間に、図面中では説明を容易にするために延在した間隙がある、1対の鉄製チップリングの図である。

【図4】図4は、高磁場スプリット対超伝導コイルセットの特徴の断面図である。

【図5】図5は、シンクロサイクロトロンビームチャンバ、加速ディー、および共振器の断面図である。

【図6】図6は、図5に示す縦軸に沿って断面を取得した、図5の装置の断面図である。

【図7】図7は、図5の装置内の共振器伝導体を通して見た、縮尺2倍サイズの断面図である。

【図8】図8は、図5の装置内の共振器外側リターンヨークを通して見た、縮尺2倍サイズの断面図である。

30

【図9】図9は、2つのディーおよび軸方向に向けられたRFポートを使用する代替的なRF構成を示す。

【図10】図10は、磁石構造体の中心軸がある面から見た、磁石構造体の断面図である。

【図11】図11は、中心軸に垂直であり、加速面に平行である面から見た、図10の磁石構造体の断面図である。

【図12】図12は、コイルおよびボビンを含むコールドマス構造体の断面図である。

【図13】図13は、コイルの内部構造を示す断面図である。

【図13A】図13Aは、図13に示す断面の拡大図である。

40

【図14】図14は、歪曲形状を有する一体型磁気シールドの断面図である。

【図15】図15は、図14の一体型磁気シールドの断面の斜視図である。

【図16】図16は、加速面において磁場を形作るために、加速チャンバ内にさらなる有効コイルを含む磁石構造体（詳細は省略）の基本形態の断面図である。

【 図 1 】

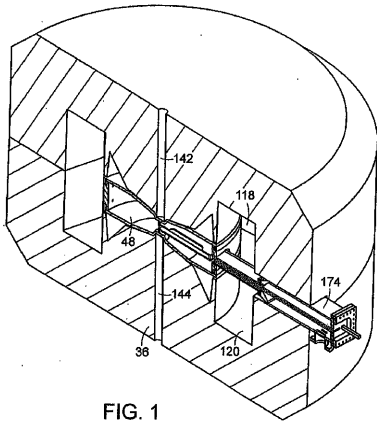


FIG. 1

【 図 2 】

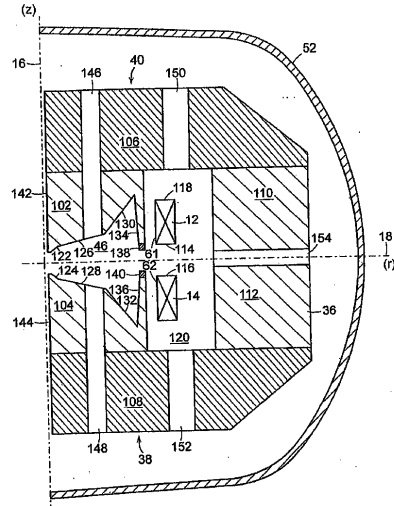


FIG. 2

【 図 3 】

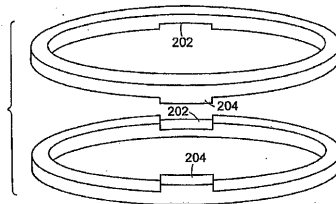


FIG. 3

【 図 4 】

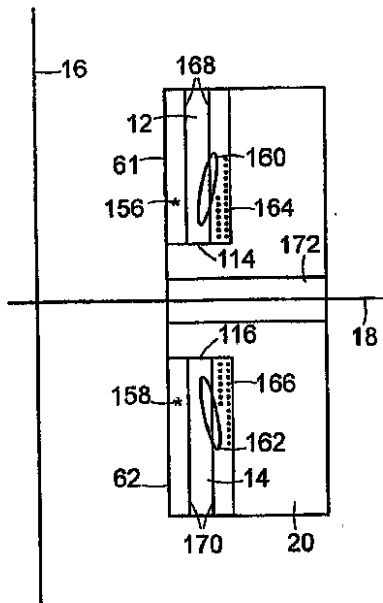


FIG. 4

【 図 5 】

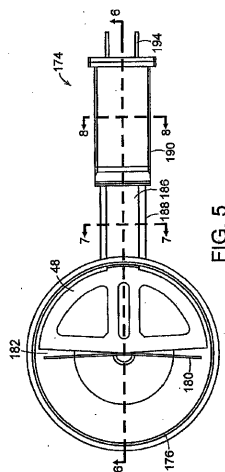


FIG. 5

【 図 6 】

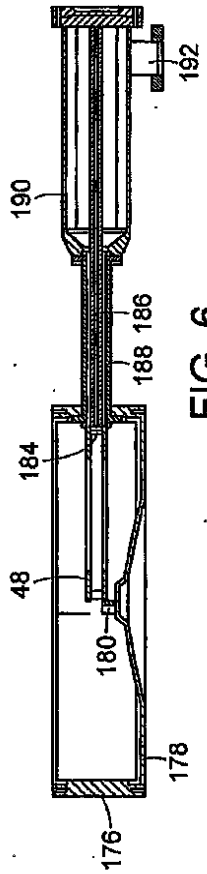


FIG. 6

【 図 7 】

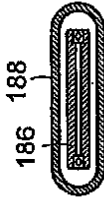


FIG. 7

【 図 8 】

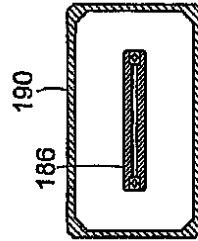


FIG. 8

【 図 9 】

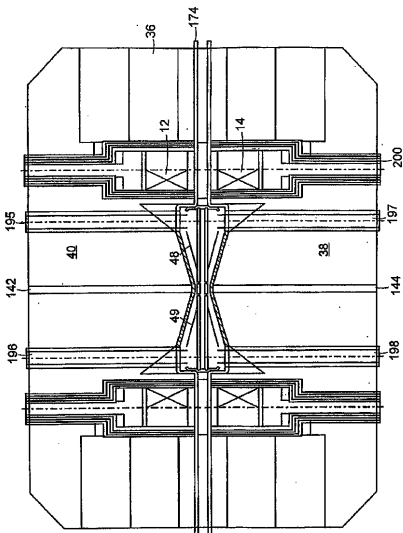


FIG. 9

【 図 10 】

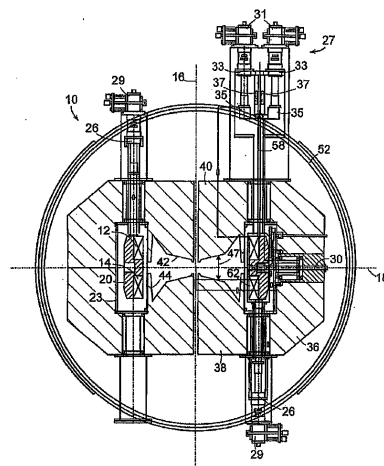


FIG. 10

【 図 1 1 】

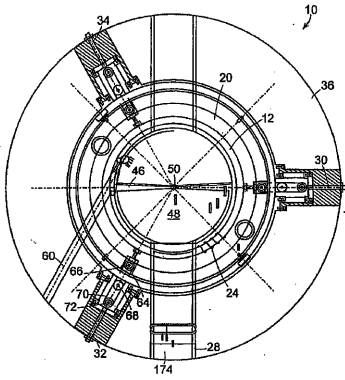


FIG. 11

【 図 1 2 】

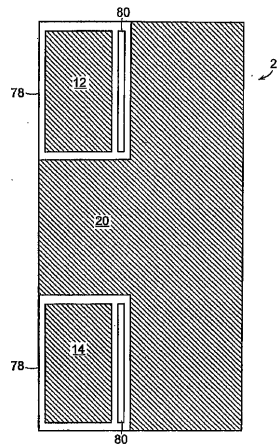


FIG. 12

【 図 1 3 】

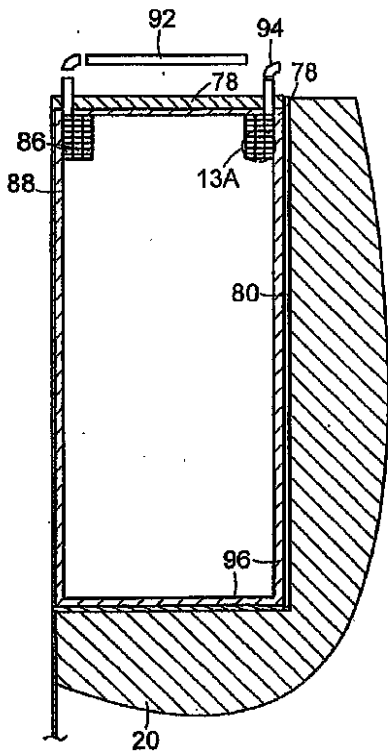


FIG. 13

【 図 1 3 A 】

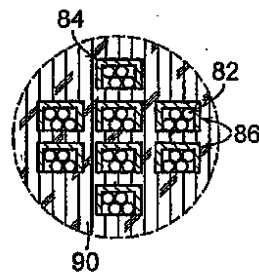


FIG. 13A

【 図 1 4 】

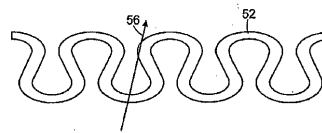


FIG. 14

【 図 1 5 】

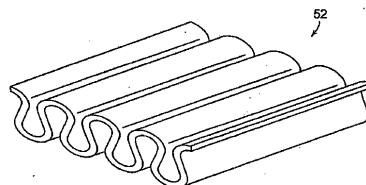


FIG. 15

【 16 】

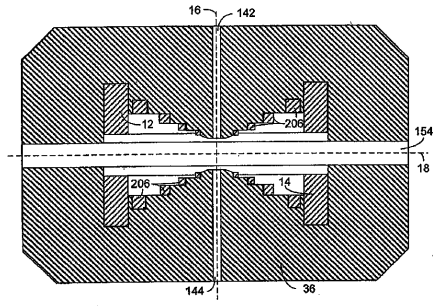


FIG. 16

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 F 7/22 G

(31)優先権主張番号 11/463,403

(32)優先日 平成18年8月9日(2006.8.9)

(33)優先権主張国 米国(US)

(72)発明者 アンタヤ, ティモシー エー.
アメリカ合衆国 ニューハンプシャー 0 3 8 4 4, ハンプトン フォールズ, プリマー レ
ーン 2 6

(72)発明者 ラドピンスキ, アレクセイ エル.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 4 6 7, ブルックライン, ブイエフダブリュー パ
ークウェイ 3 6 7

(72)発明者 シュルツ, ジョエル ヘンリー
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 4 6 0, ニュートンビル, パーク プレイス 1 5

(72)発明者 タイタス, ピーター エイチ.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 3 3 2, ダクスベリー, チャーチ ストリート 2
2 5

(72)発明者 スミス, ブラッドフォード エー.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 1 8 4 5, ノース アンドーバー, ベアー ヒル ロ
ード 4 1 9

(72)発明者 プロムバーク, レスリー
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 0 6 7, シャロン, ウィルシャー ドライブ 1 7
6

審査官 林 靖

(56)参考文献 米国特許第0 3 8 6 8 5 2 2 (US, A)

米国特許第0 3 9 2 5 6 7 6 (US, A)

米国特許第0 3 9 5 8 3 2 7 (US, A)

Bigham C. B., Magnetic trim rods for superconducting cyclotrons, Nuclear Instruments and Methods, スウェーデン, North-Holland Publishing Co., 1 9 7 5年, Vol. 131, No. 2, page 223-228

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 5 H 3 / 0 0 - 1 5 / 0 0

H 0 1 F 6 / 0 0

H 0 1 F 6 / 0 4