

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2009-524201

(P2009-524201A)

(43) 公表日 平成21年6月25日 (2009.6.25)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
H05H 7/04	(2006.01)	H05H 7/04		2G085
H05H 13/02	(2006.01)	H05H 13/02		
H01F 7/20	(2006.01)	H01F 7/20	B	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 33 頁)

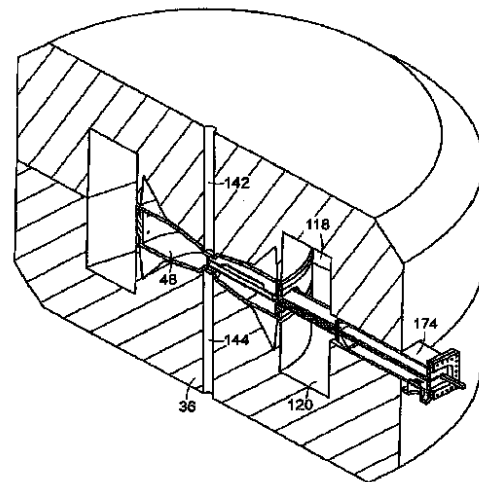
(21) 出願番号	特願2008-551454 (P2008-551454)	(71) 出願人	596060697 マサチューセッツ・インスティテュート・オブ・テクノロジー アメリカ合衆国マサチューセッツ州02139ケンブリッジ, マサチューセッツ・アヴェニュー・77
(86) (22) 出願日	平成19年1月19日 (2007.1.19)	(74) 代理人	100078282 弁理士 山本 秀策
(85) 翻訳文提出日	平成20年9月4日 (2008.9.4)	(74) 代理人	100062409 弁理士 安村 高明
(86) 国際出願番号	PCT/US2007/001628	(74) 代理人	100113413 弁理士 森下 夏樹
(87) 国際公開番号	W02007/130164		
(87) 国際公開日	平成19年11月15日 (2007.11.15)		
(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)		
(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)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高磁場超伝導シンクロサイクロトロン

(57) 【要約】

磁石構造体によって画定される加速チャンパ内の磁場は、中央加速面内に、中心軸からの半径方向距離を増大させるにつれて減少する磁場を生じさせるために、磁石ヨークの極を形作ることによって、および/またはさらなる磁石コイルを提供することによって形作られる。磁石構造体は、したがって、シンクロサイクロトロン内における荷電粒子の加速に適したものとなる。中央加速面内の磁場は「コイル支配的」であり、これは、中央加速面内の大多数の磁場が、加速チャンパの周囲に配置された1対の1次磁石コイル（例えば、超伝導コイル）によって直接生成され、磁石構造体が加速チャンパ内に弱収束および位相安定性の両方を提供するように構造化されることを意味する。磁石構造体は、極めて小型であってもよく、特に高い磁場を生じさせることができる。



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

中央加速面を有する加速チャンバを画定する 1 対の極を備える磁石ヨークを含む磁石構造体であって、該極は周辺部において接合され、かつ中心領域に極間隙を形成するために分離されており、該磁石ヨークが該加速チャンバの周囲に配置された 1 対の磁石コイルによって十分に磁化されるとき、および、少なくとも 5 テスラの中心磁場が該磁石コイルによって該中央加速面内に直接生成されるときに、中心軸から該周辺部へ半径が増加するにつれて磁場が減少する該磁場を該中央加速面内に形成するように、各極が構築される、磁石構造体。

【請求項 2】

前記磁石ヨークは、前記中央加速面に平行な前記中心軸から計測して約 114 cm を超えない外半径を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

10

【請求項 3】

前記磁石ヨークは、前記中央加速面に平行な前記中心軸から計測して約 89 cm を超えない外半径を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 4】

前記加速チャンバ全体にわたる前記極間の分離は、少なくとも 6 cm である、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 5】

前記加速チャンバ全体にわたる前記極間の分離は、少なくとも 3.8 cm である、請求項 1 に記載の磁石構造体。

20

【請求項 6】

前記磁石ヨークは、前記加速チャンバ内に粒子加速電圧を生成するために、前記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 7】

前記共振器構造は、無線周波数電圧源と連結される、請求項 6 に記載の磁石構造体。

【請求項 8】

前記極間のピーク間隙は、少なくとも約 37 cm である、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 9】

前記極のそれぞれは、極翼間に前記ピーク間隙の 3 分の 1 未満の間隙を生じさせるために、該ピーク間隙を超えて収束する該極翼を含む、請求項 8 に記載の磁石構造体。

30

【請求項 10】

前記極のそれぞれは、極翼間に前記ピーク間隙の 20% 未満の間隙を生じさせるために、該ピーク間隙を超えて収束する該極翼を含む、請求項 8 に記載の磁石構造体。

【請求項 11】

前記極翼は、前記中央加速面に対して 80° ~ 90° の角度で該中央加速面に向かって傾斜する内面を有する、請求項 10 に記載の磁石構造体。

【請求項 12】

前記極翼は、前記中央加速面に対して約 85° の角度で該中央加速面に向かって傾斜する内面を有する、請求項 10 に記載の磁石構造体。

40

【請求項 13】

前記磁石ヨークは、前記磁石コイル用の通路を画定する、請求項 9 に記載の磁石構造体。

【請求項 14】

前記磁石ヨーク内に画定された前記通路内に磁石コイルをさらに備える、請求項 13 に記載の磁石構造体。

【請求項 15】

前記極翼は、前記磁石コイルによって生成される磁場から前記加速チャンバを防護する、請求項 14 に記載の磁石構造体。

50

【請求項 16】

前記磁石ヨークは、上下の極翼に円周方向に配置された局在磁気チップをさらに備える、請求項 9 に記載の磁石構造体。

【請求項 17】

前記局在磁気チップは不連続である、請求項 16 に記載の磁石構造体。

【請求項 18】

前記極は、前記中央加速面内に、少なくとも 8 . 9 テスラの中心磁場から半径が増大するにつれて減少する磁場を形成するために、先細になっている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 19】

前記極は、前記中央加速面内に、少なくとも 9 . 5 テスラの中心磁場から半径が増大するにつれて減少する磁場を形成するために、先細になっている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 20】

前記極は、前記中央加速面内に、少なくとも 10 テスラの中心磁場から半径が増大するにつれて減少する磁場を形成するために、先細になっている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 21】

前記極は、前記中央加速面内に、7 ~ 13 テスラの中心磁場から半径が増大するにつれて減少する磁場を形成するために、先細になっている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 22】

前記極は、前記中央加速面内に、少なくとも 13 テスラの中心磁場から半径が増大するにつれて減少する磁場を形成するために、先細になっている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 23】

前記磁石ヨークは、該磁石ヨークが完全に磁化されるときに、前記中央加速面内に約 2 テスラの追加の磁場をもたらすように構築される、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 24】

前記磁石ヨークは、該磁石ヨークが完全に磁化されるときに、前記中央加速面内に約 3 テスラを超えない磁場をもたらすように構築される、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 25】

前記磁石ヨークは、ガドリニウムを含む、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 26】

弱収束磁場指数パラメータ n は、実質的に前記中央加速面の全体にわたって 0 から 1 の範囲であり、 $n = - (r / B) (dB / dr)$ かつ $dB / dr < 0$ であり、ここで B は前記磁場、 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 27】

前記極間隙は、前記中心軸からの距離が増大するにつれて内段上で拡張し、該極間隙は、該中心軸からの距離がさらに増大するにつれて外段上で減少する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 28】

前記磁石ヨークは、前記中央加速面に対して直角に計測して約 100 cm 未満の高さを有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 29】

前記磁石ヨークは、約 23 , 000 kg 未満の質量を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 30】

前記加速チャンバの周囲に配置された 1 対の 1 次磁石コイルをさらに備える、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 31】

10

20

30

40

50

前記 1 次磁石コイルによって生成される磁場を形成するための追加の磁石コイルをさらに備える、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 3 2】

前記 1 次磁石コイルおよび前記追加の磁石コイルは、少なくとも 1 つの電圧源と連結される、請求項 3 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 3 3】

前記追加の磁石コイルのうちの少なくとも 1 つは、該追加の磁石コイルを介して第 1 の方向に電流を伝導するために前記電圧源と連結されており、前記 1 次磁石コイルは、該 1 次磁石コイルを介して第 2 の方向に電流を伝導するために該電圧源と連結され、該第 2 の方向は、該追加の磁石コイルによって生成される前記磁場が、前記中央加速面の領域に前記 1 次磁石コイルによって生成される前記磁場を少なくとも部分的に相殺するように、該第 1 の方向とは逆である、請求項 3 2 に記載の磁石構造体。

10

【請求項 3 4】

前記追加の磁石コイルは、少なくとも 4 . 5 K の温度において超伝導である材料を含む、請求項 3 2 に記載の磁石構造体。

【請求項 3 5】

前記 1 次磁石コイルは、少なくとも 4 . 5 K の温度において超伝導である材料を含む、請求項 3 0 に記載の磁石構造体。

【請求項 3 6】

前記 1 次磁石コイルは、 Nb_3Sn または $NbTi$ を含む、請求項 3 5 に記載の磁石構造体。

20

【請求項 3 7】

前記磁石ヨークは、前記加速チャンバへのイオン注入用の通路を、前記中心軸に沿って画定する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 3 8】

各極は、前記中心軸から半径方向距離が増大するにつれて減少する磁場を、前記中央加速面内に生じさせるために、その内面に沿って先細になっている、請求項 1 に記載の磁石構造体。

【請求項 3 9】

前記極は組成物の変更を含み、該組成物は、前記中央加速面内に前記磁場を形成するために、異なる磁気特性を有する、請求項 1 に記載の磁石構造体。

30

【請求項 4 0】

中央加速面を有する加速チャンバを画定する 1 対の極を備える磁石ヨークを含む磁石構造体であって、該極は周辺部において接合され、かつ中心領域に極間隙を形成するために分離されており、該磁石ヨークが、該加速チャンバを取り囲んでいる 1 対の磁石コイルによって十分に磁化されるとき、および、少なくとも 5 テスラの磁場が該磁石コイルによって該中央加速面内に直接生成されるときに、該中央加速面内に、中心軸から該周辺部まで半径が増大するにつれて磁場が減少する該磁場を形成するために、各極は先細になった内面を有する、磁石構造体。

【請求項 4 1】

40

中央加速面を有する加速チャンバを画定する 1 対の極を備える磁石ヨークであって、該極は周辺部において接合され、かつ中心領域に極間隙を形成するために分離されており、該磁石ヨークは該加速チャンバの周囲に 1 次磁石コイル用の通路をも画定する、磁石ヨークと、

該加速チャンバ内に収容された、該 1 次磁石コイルによって生成される磁場と平衡するための少なくとも 1 つの追加の磁石コイルであって、該磁石ヨークから電氣的に絶縁された、追加の磁石コイルと

を含む、磁石構造体。

【請求項 4 2】

前記追加の磁石コイルは、該磁石ヨークが前記 1 次コイルによって十分に磁化されると

50

きに、中心軸から前記周辺部まで半径が増大するにつれて前記中央加速面内の磁場が減少するように、該１次コイルによって生成される磁場に平衡する磁場成分を生成するように構成され、かつ配置される、請求項４１に記載の磁石構造体。

【請求項４３】

イオン加速用の磁場を形成する方法であって、

中央加速面を有する加速チャンバを画定する１対の極を備える磁石ヨークを含む磁石構造体を提供することであって、該極は周辺部において接合され、かつ中心領域に極間隙を形成するために分離されており、各極は、該中央加速面内に、中心軸における約７テスラから該周辺部まで半径が増大するにつれて減少する磁場を形成するように構築される、ことと、

該中心領域内にイオンを注入し、該加速チャンバを介して外向き螺旋軌跡で該イオンを加速させることと

を含む、方法。

【請求項４４】

前記磁石構造体は、前記加速チャンバ内において前記イオンを安定して振動させ続けるために、復元力を提供する、請求項４３に記載の方法。

【請求項４５】

前記磁石構造体内に共振器構造を提供することであって、該共振器構造は、前記イオンに少なくとも２５０ MeVのエネルギーを与える、ことをさらに含む、請求項４３に記載の方法。

【請求項４６】

前記磁石ヨークは、前記加速チャンバ内に約２テスラを超えない磁場を生成する、請求項４３に記載の方法。

【請求項４７】

各極は、その内面に沿って、前記磁場を形作る先細部を有する、請求項４３に記載の方法。

【請求項４８】

前記磁石構造体は、前記加速チャンバの周辺部に、前記加速されたイオンの該加速チャンバからの抽出のために前記磁場を尖鋭化する１対の極翼を含む、請求項４７に記載の方法。

【請求項４９】

用途と用途との間で前記磁石構造体を移動させることをさらに含む、請求項４３に記載の方法。

【請求項５０】

前記イオンは１つを超える陽子を含む、請求項４３に記載の方法。

【請求項５１】

前記加速チャンバ内の前記中心軸において、少なくとも約５テスラの前記磁場を直接生成するために、該加速チャンバの周囲に配置された磁石コイルに電流を通すことをさらに含む、請求項４３に記載の方法。

【請求項５２】

イオン加速用の磁場を形成する方法であって、

中心軸および中央加速面を含む加速チャンバの周囲に、１対の１次磁石コイルを提供することと、

該１次磁石コイルよりも該中心軸の近くに、入れ子になった複数の追加の磁石コイルを提供することと、

該中央加速面内の該中心軸において少なくとも約５テスラの磁場を直接生じさせるために、該１次磁石コイルに電流を通すことと、

該中心軸から半径方向距離が増大する際に該中央加速面全体にわたって減少する磁場を形成するために、該追加の磁石コイルに電流を通すことであって、該１次磁石コイルによって生成される磁場とは逆の磁場を生成するために、電流が該１次磁石コイルを通過させ

10

20

30

40

50

られる方向とは逆の方向に、電流が該追加の磁石コイルのうちの少なくとも１つを通過せられる、ことと

を含む、方法。

【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。

10

【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。

20

【特許文献１】米国特許第４，６４１，０５７号明細書

【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

30

【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】

【０００３】

超伝導シンクロサイクロトロンにおいて使用するための小型磁石構造体であって、当該磁石構造体の極間に中央加速面を有する加速チャンバを画定する磁石ヨークを含む磁石構造体について、本願において説明する。１対の磁石コイル（すなわち、磁場を生成することができるコイル）－本願においては「１次」コイルと称する－は、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、加速チャンバを取り囲むヨーク内に画定される通路に収納され得る。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場成分および磁気化されたヨークによって生成された場成分の両方）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、当該面においてコイルによって直接生成される磁

40

50

場よりもはるかに小さい。磁石構造体は（極を形作ること、加速チャンバ内において逆磁場を生じさせるために有効磁石コイルを提供すること、またはそれらの組み合わせにより）、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。特定の実施形態において、1次磁石コイルは、少なくとも4.5 Kの温度において超伝導である材料を含む。

【0004】

磁石構造体は、加速チャンバ内において、荷電粒子（イオン）の加速における弱収束および位相安定性を提供するようにも設計される。弱収束は、磁場を通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多くの電圧が、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、これらの電極用の、また、当該チャンバから加速されたイオンを抽出するための抽出システム用の十分な空間を提供するように構成される。

10

【0005】

磁石構造体は、加速面の向かい合う側面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た、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を含むイオン加速器内において使用され得る。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。

20

【0006】

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114 cm）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。

30

【0007】

コイルの半径は、20インチ（約51 cm）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。

40

【0008】

50

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。

【0009】

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。

【0010】

磁石ヨークは、ほぼ対称的な1対の極を含む。当該極の内面は、それらの間に中心軸からの距離の関数として先細になった極間隙を共同で画定するという独自のプロファイルを特色とする。当該プロファイルは、（1）（内段上において、中心軸からの距離の増大時に拡張する間隙を介して）イオン加速用の正しい弱収束円形粒子加速器要件を確立する役割、および（2）（外段上において、半径方向距離の増大時に急速に減少する極間隙を介して）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役割を果たす。

【0011】

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。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。

【0012】

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。

【0013】

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

10

20

30

40

50

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。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。

【0014】

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】

【0015】

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。

【0016】

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。

【0017】

【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

30

40

50

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 . 2 8 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、 $M = i r o n V$ 、かつ $E = K (R B_0)^2 = 2 5 0 \text{ MeV}$ であり、ここで V は体積である。

【 0 0 1 8 】

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。

10

【 0 0 1 9 】

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、同期粒子加速に必要な総磁場および場の形状特性を生成しながら、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。

20

【 0 0 2 0 】

1 1 . 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 2 5 0 MeV の陽子超伝導シンクロサイクロトロンの、ヨーク 3 6、ディー 4 8、および共振器構造 1 7 4 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 2 5 0 MeV Superconducting Synchrocyclotron (1 9 9 0)」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。

30

【 0 0 2 1 】

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一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 2 5 0 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。

40

【 0 0 2 2 】

強磁性鉄ヨーク 3 6 は、ビームチャンバ、ディー 4 8、および共振器構造 1 7 4 が存在する加速領域を取り囲んでおり、ヨーク 3 6 は、上部磁石クライオスタットキャビティ 1 1 8 および下部磁石クライオスタットキャビティ 1 2 0 で示される、磁石クライオスタッ

50

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、２０ｋＶ未満の加速電圧 V_0 において $E = 250 \text{ MeV}$ 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８９ｃｍ）未満の外半径と、４０インチ（約１００ｃｍ）未満の全高と、２５トン（約３，０００ｋｇ）未満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。

【００２３】

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７．６ｃｍ）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除去のためのアクセスを提供する。

【００２４】

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１２２および１２４ならびに上部および下部の極輪郭１２６および１２８の成形による強磁性鉄ヨーク３６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１３０および１３２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１３０と１３２との間の最大極間隙（上部および下部の極翼１３４および１３６に隣接する）は、上部および下部の極輪郭１２６と１２８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１２２および１２４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１２２および１２４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１２６および１２８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１３０および１３２の傾斜は、中心（主）軸１６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１２６および１２８の比較的軽い傾斜を超えて、ここでも実質的に増大（輪郭１３０）および減少（輪郭１３２）する。

【００２５】

半径方向に外向きに動かすと、上部および下部の極翼１３４および１３６の表面の傾斜は上部および下部の極輪郭１３０および１３２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１３４と１３６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１３４および１３６の構造は、コイル１２および１４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１２および１４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超えた場の降下を尖鋭化する。翼１３４と表面１３０の接合部と翼１３６と表面１３２の接合部との間にある最も遠い間隙は、約３７ｃｍである。この間隙はその後、急激に狭くなり（中央加速面１８に対して８０～９０％の角度 例えば、約８５°の角度で）、チップ１３８と１４０との間は約６ｃｍとなる。したがって、極翼１３４と１３６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12と14との間の間隙は、本実施形態において、約10cmである。

【0026】

コイルからの磁場が増大する実施形態において、コイル12および14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134および136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126と128との間、および輪郭130と132との間で増大し、一方、極間隙は、周辺チップ138と140との間（例えば、14テスラの場用に設計された磁石構造体においては約3.8cmまで）、および中心チップ122と124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134および136の厚さ（加速面18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。

10

【0027】

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。

【0028】

20

上部および下部の極翼134および136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くに設定する。上部および下部の極翼134および136はさらに、内部加速場を強力なスプリットコイル対12および14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138および140のさらなる局在的な切片を、上部および下部の極翼134および136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。

【0029】

特定の実施形態において、鉄製チップ138および140は、その間にある間隙によって上部および下部の各極翼134および136から隔てられており、したがって鉄製チップ138および140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138および140は、別々に固定されるが、依然として磁気回路内にある。

30

【0030】

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138および140または極翼134および136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202および延在部204を含み、中心軸16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138および140は、極38および40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138および140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138および140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）。

40

【0031】

強磁性鉄ヨーク36内に画定された複数の半径方向通路154は、シンクロサイクロト

50

ロンの中央面 18 を経由するアクセスを提供する。中央面通路 154 は、ビーム抽出、ならびに共振器内部伝導体 186 および共振器外部伝導体 188 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 RF 通路 146 経由および下部軸方向 RF 通路 148 経由である。

【0032】

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 150 および下極クライオスタット通路 152 を通り、強磁性のコアおよびヨーク 36 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。

10

【0033】

強磁性鉄ヨーク 36 は、超伝導コイル 12 および 14 によって生成される磁束を加速チャンバ 46 へ搬送する磁気回路を備える。磁気回路は、ヨーク 36 を介して、上極チップ 102 および下極チップ 104 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 108 を有する上極ルート 106 と、対応する下部リターンヨーク 112 を有する上部リターンヨーク 110 とを含む。強磁性ヨーク 36 は、飽和していても加速チャンバ 46 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。

20

【0034】

上部および下部の磁石クライオスタットキャビティ 118 および 120 は、上部および下部の超伝導コイル 12 および 14 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ールドマス構造体およびクライオスタットも収納する。

【0035】

コイル 12 および 14 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 12 の底面 114 は、底部コイル 14 の向かい側の上面 116 と向かい合う。上極翼 134 は上部コイル 12 の内面 61 と向かい合い、同様に、下極翼 136 は下部コイル 14 の内面 62 と向かい合う。

30

【0036】

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 36 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 60 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 60 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。

40

【0037】

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。

50

- ・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（ ω_r , ω_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、
- 【0038】
【数1】

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

であり、一方、

【0039】

【数2】

$$v_z = \sqrt{n}$$

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。

【0040】

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。

【0041】

【数3】

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

ここで、 r は主軸 16 からイオンの半径（ 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、 $dB/dr < 0$ となる必要がある。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 ）にスケーリングすることができる。

【0042】

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

$$\omega = Q B / M$$

であり、ここで、 ω 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関

10

20

30

40

50

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。

【0043】

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 R_F とイオン回転周波数 ω との間の乗数をいう)

$$R_F = h \omega$$

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、

【0044】

【数4】

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

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

【0045】

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/mm² 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。

【0046】

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/mm² 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/mm² 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/mm² 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/mm² 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

10

20

30

40

50

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。

【0047】

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みしさも特徴とする。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、スケールング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組み込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。

【0048】

上部超伝導コイル 12 内の表面 168 と下部超伝導コイル 14 内の表面 170 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 12 および 14 は、境界 168 および 170 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。

【0049】

上部および下部のコイル 12 および 14 は、ボビン 20 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。ボビン 20 は、上部および下部のコイル 12 および 14 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 12 および 14 を半径方向および軸方向の両方に支持し、収納している。ボビン 20 は、それらの各表面 114 および 116 を介して、コイル 12 および 14 に軸方向支持を提供する。ボビン 20 内に、およびそれを介して、加速チャンバ 46 へのアクセスを提供する複数の半径方向通路 172 が画定される。また、コイル/ボビ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、ボビン 20 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。

【0050】

上部超伝導コイル 12 の点 156 および下部超伝導コイル 14 の点 158 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 12 内の交差領域 164 および下部超伝導コイル 14 内の交差領域 166 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 160 および 162 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。

【0051】

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 176 および共振器 174 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 176 は極間隙空間内に位置している。図 5 の立面図は、イ

10

20

30

40

50

オンを加速するために使用されるディー４８のうちの１つのみを示し、一方、側面図は、このディー４８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４８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１７８を含むビームチャンバ１７６によって画定される。加速間隙画定開口１８０は、電気接地面を確立する。イオンは、ディー４８と加速間隙接地面画定開口１８０との間の加速間隙１８２全体にわたる電場によって加速される。

【００５２】

間隙１８２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４８は、ディー共振器コネクタ１８４を介して共振器内部伝導体１８６および共振器外部伝導体１８８と接続される。外部共振器伝導体１８８は、高磁場シンクロサイクロトロンクライオスタット２００（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１９２を通る共振器外部伝導体リターンヨーク１９０を介して加速ディー４８ならびに内部および外部伝導体１８６および１９８に接続されたＲＦ回転キャパシタ（図示せず）によって変動する。ＲＦ伝送線連結ポート１９４を介して、ＲＦ共振回路に動力が配送される。

10

【００５３】

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ＲＦ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４８および４９が使用され、ディー４８および４９は、中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。

20

【００５４】

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。

30

【００５５】

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。

40

【００５６】

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

50

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 (Nb_3Sn)、またはニオブアルミニウム (Nb_3Al) 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 Nb_3Sn である。 $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Cu}_2\text{O}_{8-x}$ 、 $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ 、または $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 等の高温超伝導体を使用してもよい。

10

【0057】

ケーブル撚り線 82 は、複合導体 86 を形成するために、U 型銅チャネル 84 にはんだ付けされる。銅チャネル 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 86 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 96 は、銅製熱シールド 78 の内部を裏打ちし、コイル 12 を包囲する。

20

【0058】

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 650 の温度になるまで 200 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場合がある。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。

30

40

【0059】

コイル 12 および 14 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 625 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 20 内に装着される。ボビン 20 は、コイル 12 と 14 との間に介在するが、そうでない場合、コイル 12 および 14 の外側にある。ボビン 20 の頂部分および底部分 (図 12 の配向による) は、コイルの外側にあり、それぞれコイル 12 / 14 の厚さにほぼ等しい厚さ (図 12 の配向により、水平に計測) を有する。コイル 12 および 14 ならびにボビン 20 を含むコールド

50

マス構造体 21 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 23 内に入れられ、これが鉄製の極およびヨーク 36 の内側に装着され得る。コールドマス構造体 21 は、イオンを加速するための加速チャンバ 46 (図 11 参照) 用の空間および加速チャンバ 46 を超えて延在する中心軸 16 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)。

【0060】

図 11 に示すように、磁石構造体 10 は、温度上昇によって「正常」になった際にコイル 12 / 14 をクエンチするための、各コイル 12 / 14 を包囲する (例えば、コイル周囲の螺旋、そのごく一部を図 11 に示す) 導電ワイヤ 24 (例えば、ケーブルの形態で) も含む。コイル 12 / 14 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 12 / 14 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 12 および 14 に連結される。

10

【0061】

図 10 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 26 は、コールドマス構造体 21 と熱的に結合している。結合は、コイル 12 / 14 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 26 は、超伝導となる温度まで各コイル 12 / 14 を冷却することができる。したがって、各コイル 12 / 14 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。

20

【0062】

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。

30

40

【0063】

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。

【0064】

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。

50

【 0 0 6 5 】

半径方向の引張リンク 3 0、3 2、および 3 4 は、ボビン 2 0 を半径方向に外向きの引張力下に設置し、コイル 1 2 および 1 4 が中心軸 1 6 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 3 0、3 2、および 3 4 が、複数の点においてボビン 2 0 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 1 2 および 1 4 ならびにボビン 2 0 と連結される。そのようなものとして、引張リンク 3 0、3 2、および 3 4 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 3 0、3 2、および 3 4 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 6 4 および 7 0 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 1 2 および 1 4 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 6 4 は、支持杭 6 6 と支持杭 6 8 との間に延在する。ボビン 2 0 と連結された最も低温の支持杭 6 6 は約 4 . 5 K の温度であり、一方、中間杭 6 8 は約 8 0 K の温度である。より高温のバンド 7 0 は、中間杭 6 8 と高温杭 7 2 との間に延在し、約 3 0 0 K のほぼ周囲温度である。引張リンク 3 0、3 2、および 3 4 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 1 2 および 1 4 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 7 2 に外向きの力を印加してもよい。杭 6 6、6 8、および 7 2 は、ステンレス鋼で形成されてもよい。

10

20

【 0 0 6 6 】

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 7 】

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、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。

30

【 0 0 6 8 】

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ブしてもよい。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。

40

【 0 0 6 9 】

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

50

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。

【0070】

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

【0071】

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。

30

【0072】

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。

40

【0073】

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

50

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。

【 0 0 7 4 】

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

10

20

【 0 0 7 5 】

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。

30

【 0 0 7 6 】

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 7 】

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。

40

【 0 0 7 8 】

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 7 9 】

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 N b ₃ S n を使用

50

する特定の実施形態において、加速チャンバ46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12および14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38および40からの約2テスラの寄与を含み、磁場の残りは、コイル12および14によって生じる。

【0080】

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50（例えば、米国特許第4,641,057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。

10

【0081】

本実施形態において、RF加速器電極48は、基板全体にわたって20,000ボルトの電圧差を生成する。RF加速器電極48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48によって生成される場は、イオンが中心軸16の最も近くにある場合に140 MHzの周波数で振動し、周波数は、イオンが中心軸16から最も遠く、加速チャンバ46の周辺部の最も近くにある場合に、100 MHzまで低く減少する。電極48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、イオンは速度を上げ、外向きに螺旋を描く。

20

【0082】

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。

【0083】

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。

30

【0084】

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が生じると、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

40

50

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 1 2 および 1 4 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 . 5 K 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 8 8 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。

【 0 0 8 5 】

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。

【 0 0 8 6 】

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 / 2 0、1 / 1 0、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。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 8 7 】

【 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ン用の強磁性体および磁石コイルの断面図である。

【 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

10

20

30

40

50

ズの断面図である。

【図 9】図 9 は、2 つのディーおよび軸方向に向けられた R F ポートを使用する代替的な R F 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 13 A】図 13 A は、図 13 に示す断面の拡大図である。

【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。

10

【図 1】

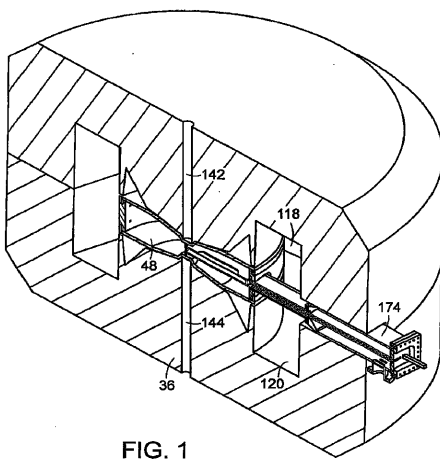


FIG. 1

【図 2】

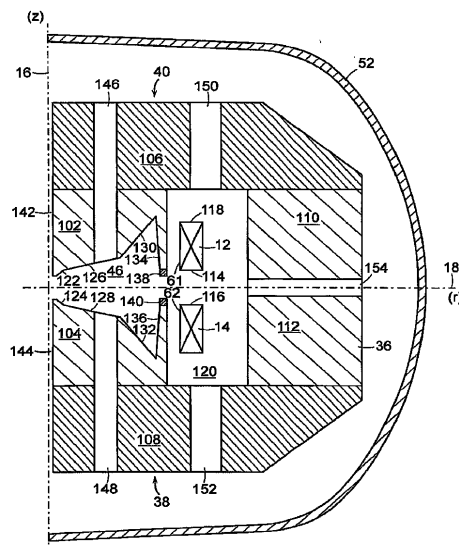


FIG. 2

【 図 3 】

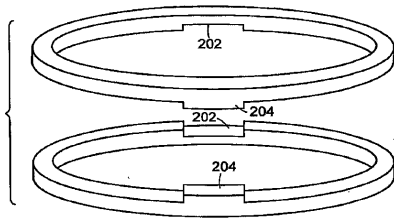


FIG. 3

【 図 4 】

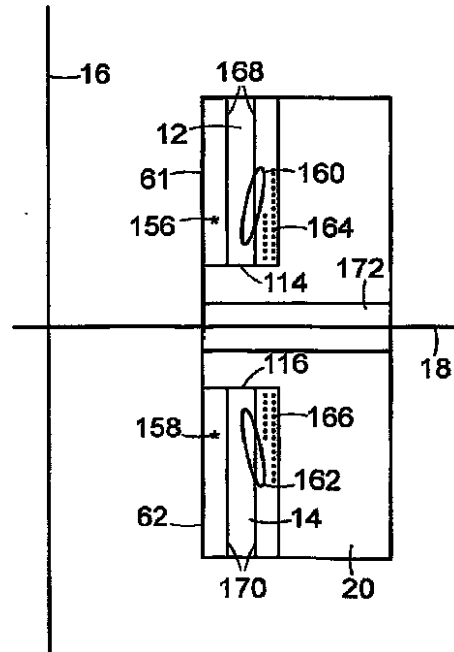


FIG. 4

【 図 5 】

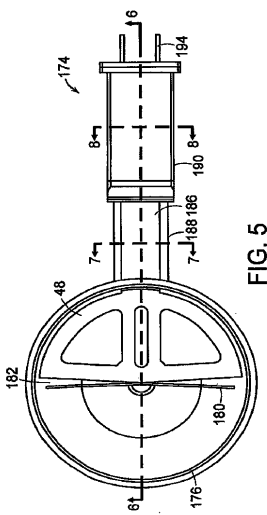


FIG. 5

【 図 6 】

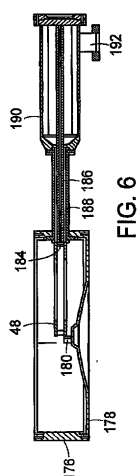


FIG. 6

【 図 7 】

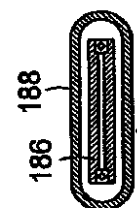
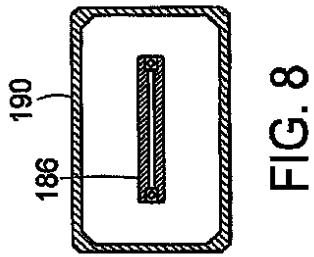
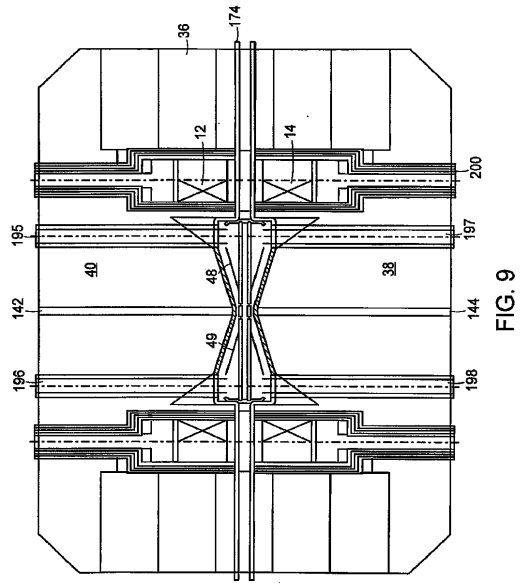


FIG. 7

【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】

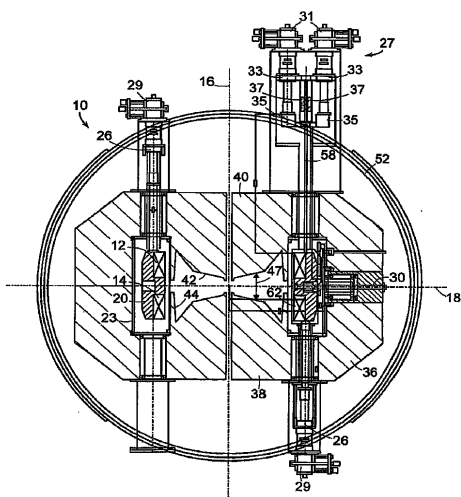


FIG. 10

【 図 11 】

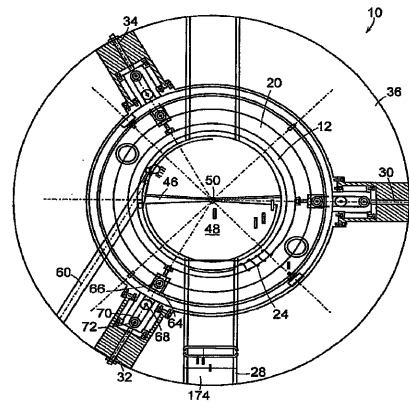


FIG. 11

【 図 1 2 】

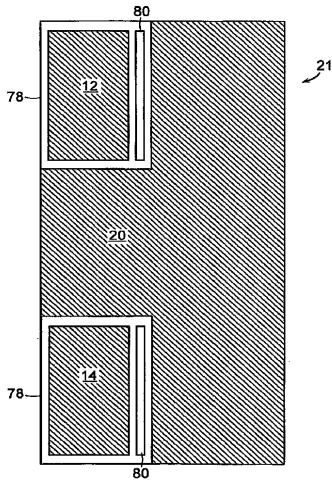


FIG. 12

【 図 1 3 】

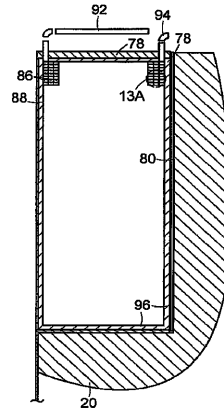


FIG. 13

【 図 1 3 A 】

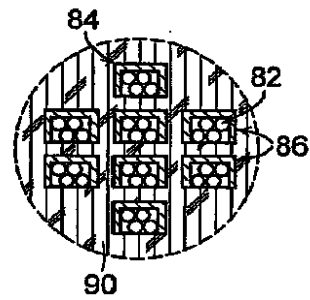


FIG. 13A

【 図 1 4 】

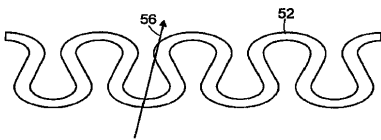


FIG. 14

【 図 1 5 】

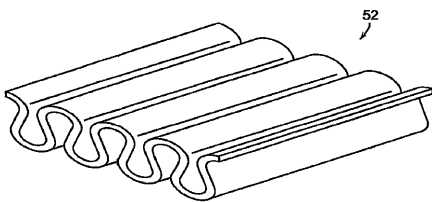


FIG. 15

【 図 1 6 】

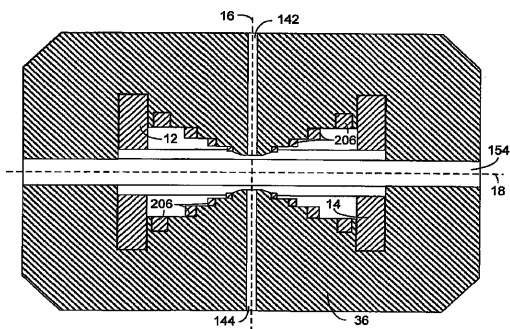


FIG. 16

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/US2007/001628

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H05H13/00 H05H13/02 H05H7/04		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H05H		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, INSPEC, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 3 925 676 A (BIGHAM CLIFFORD B ET AL) 9 December 1975 (1975-12-09) figures 1-4 column 2, lines 66,67 column 3, lines 23-34 column 4, lines 52-56 column 6, lines 9-11	1,6,7, 9-14, 18-24, 26, 28-30, 32, 35-38, 40,43, 44,46, 49,51
Y	--/--	2-5,8, 15-17, 25,27, 31,33,
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents : 'A' document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance 'E' earlier document but published on or after the international filing date 'L' document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) 'O' document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means 'P' document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed 'T' later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention 'X' document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone 'Y' document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art 'Z' document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 6 February 2008		Date of mailing of the international search report 22/02/2008
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Crescenti, Massimo

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International application No
 PCT/US2007/001628

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
		34,39, 45,47, 48,50
X	----- US 3 175 131 A (BURLEIGH RICHARD J ET AL) 23 March 1965 (1965-03-23) column 2, lines 63-68; figure 1 column 4, lines 36-46 -----	9-12,23, 24,26, 28,29, 32,41, 46,51
X	----- JP 08 264298 A (SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES) 11 October 1996 (1996-10-11) paragraphs [0006], [0007], [0021]; figures 1-9 -----	9-12,23, 24,26, 28,29, 32,41, 42,46, 51,52
Y		31,33
X	----- US 4 353 033 A (KARASAWA TAKASHI) 5 October 1982 (1982-10-05) abstract; figure 2 -----	9-12,23, 24,26, 28,29, 32,41, 42,46,51
X	----- US 4 641 057 A (BLOSSER HENRY G [US] ET AL) 3 February 1987 (1987-02-03) figure 2 column 1, lines 30-35 column 4, lines 10-16 -----	9-12,23, 24,26, 28,29, 32,46,51 2,3,45, 50
Y		
Y	----- BIGHAM C B: "Magnetic trim rods for superconducting cyclotrons" NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS NETHERLANDS, vol. 131, no. 2, 24 December 1975 (1975-12-24), pages 223-228, XP002436706 ISSN: 0029-554X figure 1; table 1 -----	4,5,8, 15,27,47
Y	----- SU 569 635 A1 (DERYAGIN ALEKSANDR V [SU]; BASHKOV YURIJ F; TKHOMIROV MIKHAIL A; PLEKH) 25 August 1977 (1977-08-25) abstract ----- -----	25,39

-/--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/US2007/001628

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KIM J W ET AL: "Trim coil system for the RIKEN superconducting ring cyclotron" PROCEEDINGS OF THE 1997 PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE (CAT. NO.97CH36167) IEEE PISCATAWAY, NJ, USA, vol. 3, 1998, pages 3422-3424 vol., XP002467835 ISBN: 0-7803-4376-X table 1	34
Y	GORDON M M ET AL: "Extraction studies for a 250 MeV superconducting synchrocyclotron" PROCEEDINGS OF THE 1987 IEEE PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE: ACCELERATOR ENGINEERING AND TECHNOLOGY (CAT. NO.87CH2387-9) IEEE NEW YORK, NY, USA, 1987, pages 1255-1257 vol., XP002467836 figures 1,4	16,17,48

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/US2007/001628

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 3925676	A	09-12-1975	CA 1015469 A1 FR 2280399 A1 GB 1457860 A NL 7506007 A	09-08-1977 27-02-1976 08-12-1976 03-02-1976
US 3175131	A	23-03-1965	NONE	
JP 8264298	A	11-10-1996	JP 3023533 B2	21-03-2000
US 4353033	A	05-10-1982	FR 2451150 A1 JP 1248040 C JP 55119400 A JP 59024520 B SE 439229 B SE 8001724 A	03-10-1980 16-01-1985 13-09-1980 09-06-1984 03-06-1985 08-09-1980
US 4641057	A	03-02-1987	NONE	
SU 569635	A1	25-08-1977	NONE	

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW

(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 03844, ハンプトン フォールズ, プリマー レ
ーン 26

Fターム(参考) 2G085 AA11 BA16 BC03 BC04 BC05 BC06 BC15 BC18 CA16 EA01