

發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※ 申請案號： 9610 3333

※ 申請日期： 96.1.30

※IPC 分類： H05H 2/04 (2006.01)

一、發明名稱：(中文/英文)

用於粒子加速之磁鐵結構

MAGNET STRUCTURE FOR PARTICLE ACCELERATION

二、申請人：(共 1 人)

姓名或名稱：(中文/英文)

麻省理工學院

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

代表人：(中文/英文)

丹尼爾 歐布萊恩 / O'BRIEN, DANIEL

住居所或營業所地址：(中文/英文)

美國麻州 02412-1493 劍橋市坎登廣場劍橋中心 5 號 科技執照辦公室
NE25-230

Technology Licensing Office-Room NE25-230, Five Cambridge Center,
Kendall Square, Cambridge, MA 2412-1493, U.S.A.

國 籍：(中文/英文)

美國 / USA

三、發明人：(共 6 人)

姓 名：(中文/英文)

1. 提摩西 A . 安塔亞 / ANTAYA, TIMOTHY A .

2. 亞列瑟 L . 雷都文斯基 / RADOVINSKY, ALEXEY L .

3. 喬爾 亨利 舒茲 / SCHULTZ, JOEL HENRY

4. 彼得 H . 提圖斯 / TITUS, PETER H .

5. 布雷佛 A . 史密斯 / SMITH, BRADFORD A .

6.賴斯雷 布羅波格 / BROMBERG, LESLIE

國 籍：(中文/英文)

1.2.3.4.5.6.美國 / USA

四、聲明事項：

主張專利法第二十二條第二項 第一款或 第二款規定之事實，
其事實發生日期為： 年 月 日。

申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號 順序註記】

有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1. 美國、2006.8.9、11/463,403
2. PCT、2007.1.19、PCT/US07/01506

無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號 順序註記】

主張專利法第三十條生物材料：

須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼 順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼 順序註記】

不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

五、中文發明摘要：

一種用於粒子加速的磁鐵結構，其中包含至少兩個線圈，其包含有一超導材料〔例如具有一 A15 類型之結晶結構的鈮三錫 (Nb_3Sn)〕之連續路徑，以供電流流過。該等線圈可安裝於一捲筒內，而連同於線圈共同構成一冷質結構。藉由低溫冷卻器將該等線圈冷卻至其超導溫度。徑向張力組件係耦接於該冷質結構以保持其集中設置，使得其可維持實質對稱圍繞於一中央軸線，而不致被作用於其上之磁力所拉而不對齊。可將一接線纏繞於該線圈，並且可對其施加一電壓俾淬息該等線圈，以防止在部分超導條件下進行其線圈運作，否則如此可能對其造成損害。一磁軌環繞於該冷質量結構，並且含有一對磁極，而可於其間部分地界定出一加速室。該等磁極的內部表面具有漸細外形，這可建立一正確的微弱聚焦要求，並且對於離子加速提供相態穩定性，同時藉由提高相對於半徑之能量增益以縮小磁極直徑。一整合磁屏蔽係定位為圍繞該磁軌，藉以納入自其散發出的磁場，並且可具有一彎曲組態以納入具有各種方向的磁場。該磁鐵結構可極為精巧，並且可產生特高磁場。

六、英文發明摘要：

A magnet structure for particle acceleration includes at least two coils that include a continuous path of superconducting material [e.g. niobium tin (Nb_3Sn) having an A15-type crystal structure] for electric current flow there through. The coils can be mounted in a bobbin, which together with the coils form a cold-mass structure. The coils are cooled to their superconducting temperatures via cryocoolers. Radial-tension members are coupled with the cold-mass structure to keep it centered, such that it remains substantially symmetrical about a central axis and is not pulled out of alignment by magnetic forces acting thereon. A wire can be wrapped around the coils, and a voltage can be applied thereto to quench the coils to prevent their operation of the coils in a partially superconducting condition, which may otherwise cause damage thereto. A magnetic yoke surrounds the cold-mass structure and includes a pair of poles that, in part, define an acceleration chamber there between. The inner surfaces of the poles have tapered profiles that establish a correct weak focusing requirement and that provide phase stability for ion acceleration and that reduce pole diameter by increasing energy gain versus radius. An integral magnetic shield is positioned about the yoke to contain magnetic fields emanating there from and can have a tortuous configuration to contain magnetic fields having a variety of orientation. The magnet structure can be very compact and can produce particularly high magnetic fields.

七、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第 (12) 圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

12 上超導線圈

14 下超導線圈

20 捲筒

21 冷質結構

78 銅質熱屏蔽

80 加壓囊

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

無

九、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明係關於用於粒子加速之磁性結構。

【先前技術】

含有一超導線圈以及磁極的磁鐵結構已經被開發用來在兩種迴旋加速器(等時迴旋加速器以及同步迴旋加速器)中產生磁場。同步迴旋加速器和所有的迴旋加速器相同，均會以一高頻的交流電壓在一從一中心軸朝外的螺旋路徑中來加速帶電粒子(離子)，該等離子會從該中心軸被引入。同步迴旋加速器的進一步特徵係，當該等粒子被加速時會調整該外加電場的頻率，以便考量到速度提高時會相對提高粒子質量。同步迴旋加速器的特徵還有它們的體積能夠非常地小，且它們的尺寸可隨著該等磁極之間所產生的磁場的強度增加而幾乎以立方的方式縮小。

當該等磁極發生磁性飽和時，便可在該等磁極之間產生約 2 個特斯拉的磁場。不過，如本文以引用的方式將其完整併入的美國專利案第 4,641,057 號中所述，經證實，於一同步迴旋加速器中使用超導線圈則會將磁場提高至約 5 個特斯拉。在 X. Wu 於 1990 年在密西根州立大學所發表的博士論文「Conceptual Design and Orbit Dynamics in a 250Mev Superconducting Synchrocyclotron」中便對於在一迴旋加速器中使用超導線圈來產生高達約 5.5 個特斯拉的磁場作過額外的概念性討論；再者，J. Kim 於 1994 年在

密西根州立大學所發表的博士論文「An Eight Tesla Superconducting Magnet for Cyclotron Studies」中則對於在一等時迴旋加速器(其中，磁場會隨著半徑而增加)中使用超導線圈來產生 8 個特斯拉的磁場作過討論。前述兩篇論文均可在 <http://www.nsl.msu.edu/ourlab/library/publications/index.php> 處取得，且本文以引用的方式將兩者完全併入。

【發明內容】

一種精巧磁鐵結構包含有一冷質結構，其中包含至少兩個超導磁性線圈(亦即用於產生一磁場之超導線圈)。該冷質結構限定一加速室，而一中間加速平面及一區段中央軸線係延伸跨於該加速室。一磁軛係纏繞於該冷質結構並且包含有一對磁極，其漸細內部表面於其間界定出一磁極間隙，其中位於該等磁極之間間隙延伸跨於該加速室，並且其中該磁軛徑向限定該中央軸線在該加速室之內的區段。該等磁極的內部表面係漸細(在該中間加速平面之相對側上約為對稱)，藉此在一自該中央軸線之較大徑向距離之一尖峰間隙跨於一內級處，自鄰近該中央軸線之內部磁極頂尖之間隙係增加至超過雙倍，並且在一自該中央軸線之更大徑向距離處，將在一外級上的間隙自該尖峰間隙降低至一分隔，該分隔係小於磁極翼上之一對頂尖處之尖峰間隙一小於之一半。

該等磁極因此經塑形以對於在該加速室之內之加速的帶電粒子(離子)提供微弱聚焦，也對於加速粒子提供相位

穩定性。微弱聚焦會在經由該磁場於一朝外螺旋中進行加速時讓該等帶電粒子維持在正確位置處。相位穩定性則確保該等帶電粒子會取得足夠的能量，以便在該加速室之中維持所希望的加速。明確地說，必須一直提供高於用來維持離子加速所需的電壓給該加速室中的高電壓電極；而該磁鐵結構則會被配置成用以在該加速室中為該些電極提供足夠的空間，並且提供足夠的空間給一抽出系統，用以從該加速室中抽出該等經加速的離子。可透過外級上之增加徑向距離處的快速縮減磁極間隙，藉由提高相對於半徑之能量增益以縮小磁極直徑。

該超導磁性線圈可納入在由該磁軌中所界定之通道內，並用於在該加速室之中間加速平面內直接地產生極高磁場。當啟動之後，該等超導磁線圈便會「磁化」該磁軌，俾使該磁軌同樣會產生一磁場，該磁場可被視為不同於由該等磁線圈直接產生的磁場。兩個磁場分量(也就是，直接由該等超導磁性線圈所產生的分量以及由該經磁化的磁軌所產生的分量)均會以約正交於該中央加速平面來穿過該中央加速平面。不過，由該經完全磁化的磁軌在該中央加速平面處所產生的磁場會遠小於由該等線圈在該平面處所產生的磁場。該磁軌之磁極的漸細表面可沿該中間加速平面將磁場加以塑形，俾使該磁場會隨著從一中央軸線至該加速室周圍的半徑增加而降低，以便使其用在一同步迴旋加速器之中。

在其他實施例裡，可使用額外的磁性線圈以在該加速

室內產生塑形磁場，俾提供微弱聚焦及相位穩定性兩者特性。可運用這些額外線圈(現將前段中所述之超導線圈稱為「主」線圈)以取代或組合於該漸細磁極表面，雖然其結果為在該加速室內跨於該中間加速平面之類似的磁場塑形處理。

該等兩個主要超導線圈係以對稱的方式被放置在一加速平面的兩側並且被安置在一真空低溫槽中因經拉張元件而懸浮的一冷捲筒之中。在該冷質結構周圍的係一磁軛，舉例來說，其係由低碳鋼所構成。該冷質結構與該磁軛會在位於該等磁極之間的一真空射束室的加速平面中共同產生一約 7 個特斯拉或更大(於特殊的實施例中，則係 9 個特斯拉或更大)的組合磁場，用以加速離子。當該等線圈處於超導狀態中且有一電壓被施加至該等線圈以啟動且保持一連續電流流經該等線圈時，該等超導線圈便會在該加速室之中產生實質大部份的磁場，舉例來說，約 5 個特斯拉或更大(於特殊的實施例中，則係約 7 個特斯拉或更大)。該磁軛會藉由該等超導線圈所產生的磁場而被磁化並且能夠貢獻另外 2 個特斯拉給在該用於離子加速的加速室之中所產生的磁場。

利用該高磁場，該磁鐵結構便可變得特別地小。於該加速平面中具有 7 個特斯拉組合磁場的一實施例之中，該磁軛的外徑為 45 英吋(~114cm)或更小。在被設計成用於較高磁場的磁鐵結構中，該磁軛的外徑甚至會更小。該磁鐵結構的特殊額外實施例則係被設計成用在該中央加速平面

中的磁場為 8.9 個特斯拉或更高、9.5 個特斯拉或更高、10 個特斯拉或更高、介於 7 與 13 個特斯拉之間的其它磁場、以及 13 個特斯拉以上的磁場。

該等線圈的半徑可能係 20 英吋(~51cm)或更小，同樣地，對用於高磁場來說甚至還會更小。而該等線圈中的超導材料可能係 Nb_3Sn ，其可在用於加速的磁極間隙中產生 9.9 個特斯拉或更大的起始磁場；或是 $NbTi$ ，其可在用於加速的磁極間隙中產生 8.4 個特斯拉或更大的起始磁場。於一特殊的實施例中，每一個線圈均係由一種 A15 Nb_3Sn 的第 II 型超導體所構成。該等線圈可以圓形環狀或以一組同心環的形式來捲繞一已經反應的 Nb_3Sn 合成導體而形成。該合成導體可能係被焊接在一銅質管道中的一已反應 Nb_3Sn 纜線，或者是只有該纜線。該纜線係由含銅與屏障材料之錫與鈮前軀體成份所組成的預設數量絞線組裝而成。接著，該等經捲繞的絞線便會被加熱，用以與該等母質成份進行反應而形成 Nb_3Sn ，其中，越靠近該絞線之剖面的周圍，該結構中的鈮含量便會越高。

此外，還可將一與一電壓源耦合的導電線纏繞在每一條線圈上。接著，當該線圈於運作期間在其內緣處率先開始損失其超導性時，藉由施加一足夠的電壓至該電線，便可使用該電線來「淬息(quench)」該超導線圈(也就是，讓整個線圈保持「常態」而非超導狀態)，從而利用高電阻率之局部熱點來消除其運作的可能性，便可維護該線圈。或者，亦可將不鏽鋼或其它導體金屬(例如銅或黃銅)條附著

至該線圈周圍或是內嵌在該等線圈之中，俾使在一電流通過該等金屬條時，該等線圈便會受熱而淬息該超導狀態並且從而保護該線圈。

於運作期間，該等線圈可維持在「乾」條件之中(也就是，並未被浸沒在液體冷卻劑之中)；更確切地說，可藉由低溫冷卻器來將該等線圈冷卻至該超導體之臨界溫度以下的溫度處。進一步言之，該冷質結構可耦合複數個徑向拉張部件，該等徑向拉張部件係在運作期間有特別高磁場的存在與影響下用來讓該冷質結構集中於該中央軸線的周圍處。

此外，該離子加速器還可具有一合宜的精巧型射束室、D形物以及共振器結構，該等離子會於其中被形成、被捕獲於經加速的軌道之中、被加速至最終的能量、然後會被抽出以用在數項離子束應用之中。該射束室、共振器、以及D形物結構係存在於該超導磁鐵結構之該等磁極之間的一開放空間之中，且該磁鐵結構會因而被配置成用以容納該些組件(然而仍可提供特殊磁場塑形)。該射束室包含提供離子束成形。該等離子可於一內部離子源之中來形成，或是可由一具有一離子射出結構的外部離子源來提供。該射束室會被抽成真空並且還會充當該射頻加速結構的接地平面。該RF加速結構包含：一D形物或多個D形物；用於界定加速間隙的其它表面或結構；以及傳送構件，用以將該等射頻波從一外部產生器傳送至該射束室之中，以便激發該D形物或該等多個D形物。

又進一步言之，還可提供一整合磁屏蔽，用以包圍該磁軌並且含有於其中所產生的外部磁場。該整合磁屏蔽可由低碳鋼所構成(和該磁軌類似)並且係被設置在一於其運作期間可由該磁鐵結構來產生的一 1,000 高斯磁通量密度的等高線的外面。該屏蔽可具有一扭曲的形狀，俾使延伸至該磁軌外面的磁通量線會在複數個位置處以及在複數個角度處與該整合磁屏蔽相交，用以改良限定具有各種方向之磁場的效果。容易受到高磁場影響的該等低溫冷卻器及其它作用元件的頭部會被設置在該整合磁屏蔽的外面。

本發明的設備與方法可從一非常精巧的結構中產生極高的磁場，從而產生一具有高能量(以及短波長)粒子的類點狀頭射束(也就是，具有一小型的空間剖面)。此外，本發明的整合磁屏蔽可極佳地限定於該處所產生的磁場。本發明的精巧結構可用在各種廣泛應用的粒子加速器之中，其中，該加速器可能具有一可攜型式，舉例來說，可使用在一載具上或是一車輛之中，並且可被重新定位以提供一暫時性的有能量離子源，用來進行診斷或風險偵測，例如，用在港口處或其它類型運輸中心處的安全系統之中。因此，該加速器便可被用在有需要的地方，而非僅能被用在一專屬的加速器設施之中。又進一步言之，舉例來說，該加速器還可被安置在一起重架上，用於在一單房系統中以一固定目標物(舉例來說，一病患)為基準來移動該加速器，以便從各種不同來源位置處利用從該加速器所射出的經加速離子來照射該目標物。

【實施方式】

本文所述之眾多發明具有廣泛的利用性，超出它們在同步迴旋加速器中的實施(舉例來說，可應用在等時迴旋加速器以及應用在採用超導體及/或用於產生高磁場的其它應用之中)，並且能夠輕易地運用在其它領域之中。不過，為方便參考起見，本說明一開始會先解釋一同步迴旋加速器領域中的基礎原理與特點。

一般來說，同步迴旋加速器具有下面的特徵：離子粒種的電荷(Q)；被加速離子的質量(M)；加速電壓 V_0 ；最終能量 E；與一中央軸線相隔的最終半徑 R；以及中央磁場 B_0 。參數 B_0 與 R 均與最終能量有關，所以，僅需要規定其中一者。明確地說，藉由參數組 Q、M、E、 V_0 、以及 B_0 便可特徵化一同步迴旋加速器。本發明的高磁場超導同步迴旋加速器包含數項重要特點與元件，它們的功能會依循同步加速的原理，用以創造、加速、以及抽出具有一特殊 Q、M、E、 V_0 、以及 B_0 的離子。此外，當單獨提高中央磁場而所有其它關鍵參數均維持恆定時便會看見該加速器的最終半徑會等比例縮減；而該同步迴旋加速器則會變得非常地精巧。隨著中央磁場 B_0 增加而提高整體的精巧性約略可以最終半徑的三次方， R^3 ，來加以特徵化，而且其結果如下表中所示，其中，大幅地提高磁場便會大幅地縮減該同步迴旋加速器的近似體積。

B_0 (特斯拉)	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

上表中的最末行代表的係體積縮小倍數，其中， R_1 係磁極半徑，在 B_0 為 1 個特斯拉時，該半徑為 2.28m；而 R 為每一列中之中央磁場 B_0 的對應半徑。於本範例中， $M = \rho_{\text{iron}} V$ ，而 $E = K(RB_0)^2 = 250\text{MeV}$ ，其中， V 為體積。

會隨著中央磁場 B_0 增加而大幅改變的其中一項因素便係該同步迴旋加速器的成本，其將會下降。會大幅改變的另一項因素則係該同步迴旋加速器的可攜性；也就是，應該更容易重新定位該同步迴旋加速器；舉例來說，可將該同步迴旋加速器放置在一起重架上並且繞著一病患移動，用以進行癌症的放射治療；或者可將該同步迴旋加速器放置在一載具或一卡車上，以使用在移動式應用中，例如，可用在運用有能量的類點狀粒子束的入口通道安全監控應用之中。會隨著磁場增加而改變的另一項因素便係尺寸；也就是，該同步迴旋加速器的所有特徵與重要元件以及離子加速的特性同樣均會隨著磁場增加而實質縮減尺寸。本文所述的方式係藉由利用會產生該等磁場的超導磁性結構來提升磁場便可大幅地縮減該同步迴旋加速器的整體尺寸（針對一固定的離子粒種以及最終能量）。

針對一給定的能量 E 、電荷 Q 、質量 M 、以及加速電壓 V_0 來說，當提升磁場 B_0 時，該同步迴旋加速器係具有一種用於產生所需要之磁性能量的結構。此磁性結構會為該結構的該等超導元件提供穩定性以及保護，減輕因提高中央磁場 B_0 時而伴隨發生的龐大電磁作用力，以及為該超導冷質結構提供冷卻作用，同時會產生同步粒子加速的必要總磁場以及磁場形狀特徵。

圖 1 中所示的係一 9.2 個特斯拉、250MeV 之質子超導同步迴旋加速器的磁軌 36、D 形物 48、以及共振器結構 174，該同步迴旋加速器具有運作在 11.2 個特斯拉之尖峰磁場處以 Nb_3Sn 為主的超導線圈(圖中並未顯示)。在 X. Wu 於 1990 年在密西根州立大學所發表的博士論文「Conceptual Design and Orbit Dynamics in a 250Mev Superconducting Synchrocyclotron」中於 5.5 個特斯拉處所獲得的解答中利用一新穎的定標方法(scaling method)便會預測出此同步迴旋加速器解答；咸信 Wu 的論文已經在當時的同步迴旋加速器設計中提出最高的中央磁場(B_0)位準—其已經在詳細分析結果或是經實驗操作證明中被提出。

該高磁場定標規則並不要求該等新的離子粒種必須與本文中所提出的特殊範例相同(也就是，該等定標定律係通用的，並不僅限用在 250Mev 以及質子)；實際上，電荷 Q 以及質量 M 可能並不相同；而且亦可針對一不同的 Q 與 M 來為一新的粒種決定出一定標解答。舉例來說，於另一實施例中，該等離子係除去電子具有一+6 電荷的碳原子(也

就是， $^{12}\text{C}^{6+}$)；相較於一較低質量、較低電荷的粒子，於此實施例中，僅需要較小的終極塑形磁場(舉例來說，該等磁極表面的輪廓會比較平坦)。另外，新的定標能量 E 可能不同於先前的最終能量。又進一步言之， B_0 亦可改變。藉由前述每一項改變，加速的同步迴旋加速模式便可維持不變。

鐵磁鐵質磁軛 36 包圍該射束室、D 形物 48、以及共振器結構 174 所在的加速區；磁軛 36 還包圍該磁鐵低溫恆溫器的空間，由上磁鐵低溫恆溫器腔 118 以及下磁鐵低溫恆溫器腔 120 所示。該加速系統射束室、D 形物 48、以及共振器結構 174 的尺寸係被設計成用在低於 20kV 之加速電壓 V_0 下的一 $E=250\text{MeV}$ 質子束 ($Q=1$ 、 $M=1$)。該鐵磁鐵質核心以及迴轉磁軛 36 被設計成一分離結構，用以幫助組裝與維修；而且其外徑小於 35 英吋 (~89cm)，總高度會小於 40 英吋 (~100cm)，而總質量則小於 25 噸 (~23,000kg)。磁軛 36 維持在室溫處。此特殊解答可用在經確認會因一精巧的高磁場超導同步迴旋加速器而發揮作用的任何前述應用之中，例如放在一起重架上、放在一平台上、或是放在一卡車上、或是放在一應用場所處的一固定位置中。

為清楚起見，圖 1 中並未顯示出用於高磁場同步迴旋加速器運作的鐵磁鐵質磁軛結構 36 的眾多其它特徵。現在將在圖 2 中顯示出該些特徵。該同步迴旋加速器的結構以其主軸線 16 為中心近乎達到 360 度的旋轉對稱，以允

許在特殊的位置處會有分離的埠以及其它分離的特徵。該同步迴旋加速器還具有一中央加速平面 18，該平面係該鐵磁磁軌 36 的鏡射對稱平面，以及該分離線圈對 12、14 的中間平面；該中央加速平面也是該射束室(被界定在該等磁極 38 與 40 之間)、D 形物 48、以及共振器結構 174 的垂直中心以及加速期間的粒子軌道的垂直中心。該高磁場同步迴旋加速器的鐵磁磁軌結構 36 係由多個元件所組成。該等磁極 38 與 40 會界定一上中間通道 142 以及一下中間通道 144，兩者會以該同步迴旋加速器的中央軸線 16 為中心來對齊排列且每一者的直徑約為 3 英吋(~7.6cm)，它們可供置入與移除被放置在加速室 46 之中央區中的中央平面 18 處之主軸線 16 上的離子源。

一精細的磁場結構係用來穩定加速該等離子。該精細的磁場組態係藉由下面來提供：設計鐵磁鐵質磁軌 36 的形狀；設計上磁極尖端等高線 122 與下磁極尖端等高線 124 以及用於進行初始加速的上磁極等高線 126 與下磁極等高線 128 的形狀；以及設計用於進行高磁場加速的上磁極等高線 130 與下磁極等高線 132 的形狀。於圖 2 的實施例中，該等上磁極等高線 130 與下磁極等高線 132(與該等上磁極翼 134 與下磁極翼 136 相鄰)之間的最大磁極間隙會比該等上磁極等高線 126 與下磁極等高線 128 之間的最大磁極間隙的尺寸大兩倍，並且會比該等上磁極尖端等高線 122 與下磁極尖端等高線 124 處的最小磁極間隙的尺寸大五倍。如圖中所示，該等上磁極尖端等高線 122 與下磁極尖端等

高線 124 的斜度會比用於進行初始加速的相鄰上磁極等高線 126 與下磁極等高線 128 的斜度還要陡峭。在該等上磁極等高線 126 與下磁極等高線 128 之相對較小斜度之後，用於進行高磁場加速的上磁極等高線 130 與下磁極等高線 132 的斜度又會再度實質上升(等高線 130)與下降(等高線 132)，以便提高該磁極間隙隨著與該中央(主)軸線 16 相隔的徑向距離增加而擴大的速率。

快速地往外移動，該等上磁極翼 134 與下磁極翼 136 之表面的斜度會比該等上磁極等高線 130 與下磁極等高線 132 的斜度又更為陡峭(並且方向相反)，俾使該磁極間隙的尺寸會隨著該等磁極翼 134 與 136 之間的半徑增加而快速地縮減(縮減倍數大於五倍)。據此，該等磁極翼 134 與 136 的結構會藉由陷捕靠近該等線圈 12 與 14 的內磁場線來實質擋住由該等線圈 12 與 14 所產生的磁場，避免它們朝該加速室的外圍移動，從而讓位於該些經陷捕磁場線外面的磁場急速地下降。最遠的間隙(其係位於具有表面 130 的磁極翼 134 的接點以及具有表面 132 的磁極翼 136 的接點之間)約為 37cm。接著，該間隙便會驟然地(以與該中央加速平面 18 形成介於 80° 與 90° 之間的角度—舉例來說，以約 85° 的角度)窄化至介於尖端 138 與 140 之間的約 6cm 處。據此，介於該等磁極翼 134 與 136 之間的間隙可小於該等磁極間之最遠間隙之尺寸的三分之一(甚至會小於五分之一)。於此實施例中，介於該等線圈 12 與 14 之間的間隙約為 10cm。

於源自該等線圈的磁場被提高的實施例中，該等線圈 12 與 14 包含較多的安培圈而且彼此會進一步隔開，而且還會被放置在更靠近該等個別磁極翼 134 與 136 的位置處。再者，在被設計成用於高磁場的磁鐵結構之中，介於等高線 126 與 128 之間以及介於等高線 130 與 132 之間的磁極間隙會加大，而介於周圍尖端 138 與 140 之間的磁極間隙則會縮窄(舉例來說，在針對一 14 個特斯拉磁場所設計的磁鐵結構之中會縮窄至約 3.8cm)且介於中央尖端 122 與 124 之間的磁極間隙亦會縮窄。又進一步言之，於該些實施例中，該等磁極翼 134 與 136 的厚度(平行於該加速平面 18 所測得者)會增加。再者，外加電壓則比較低，而該等離子的軌道則更為精巧且數量更大；軸向與徑向射束間隔則會更小。

圖 2 中所示的該等高線變化僅係代表例——就每一種高磁場同步迴旋加速器定標解答來說，可能會有不同數量的磁極漸細變化，以適應於相位穩定加速與微弱聚焦；該等表面還可具有平滑變化的等高線。離子會具有一螺旋狀的平均軌道，其係沿著半徑 r 來擴大。該等離子還會繞著此平均軌道進行小幅正交振盪。該繞著該平均半徑所進行的小幅振盪便係已知的貝它振盪(betatron oscillation)，而且它們係界定加速離子的特殊特徵。

該等上磁極翼 134 與下磁極翼 136 會藉由移動特徵軌道阻尼而讓用於抽出的磁場邊緣變得更為尖銳，其會讓最終可達成的能量更接近該磁極邊緣。該等上磁極翼 134 與

下磁極翼 136 還會用以遮擋源自該強烈分離線圈對 12 與 14 的內部加速磁場。藉由讓鐵磁性的上鐵質尖端 138 與下鐵質尖端 140 的額外局部化部件被放置在該等上磁極翼 134 與下磁極翼 136 之面的周圍處以建立一充份的非軸對稱緣磁場便可適應於習知的再生同步迴旋加速器抽出或自行抽出。

於特殊的實施例中，該等鐵質尖端 138 與 140 會與個別的上磁極翼 134 與下磁極翼 136 透過其間間隙而彼此分離；從而可將該等鐵質尖端 138 與 140 併入該射束室內部，藉以讓該等射束室護壁會穿過該間隙。雖然該等鐵質尖端 138 與 140 會被分開固定，不過它們仍會處於該磁性電路之中。

於其它實施例中，如圖 3 中所示，該等鐵質尖端 138 與 140 或是該等磁極翼 134 與 136 可不對稱於該中央軸線 16，其包含狹縫 202 與延伸部 204，用以分別降低與提高該些位置處的磁場。於其它實施例中，該等鐵質尖端 138 與 140 於磁極 38 與 40 的周圍處並非係連續的，更確切地說，它們係具有藉由間隙來分離的不同區段的形式，其中，於該等間隙處會產生較低的局部磁場。在又一實施例中，藉由改變該等鐵質尖端 138 與 140 的組成或是藉由在該等尖端 138 與 140 之周圍中的不同位置處併入具有不同磁特性的選定材料便會產生不同的局部磁場。該磁軌中其它地方的組成同樣可以改變(舉例來說，藉由提供具有不同磁特性的不同材料)，以便於必要時(舉例來說，用於為該等被

加速離子提供微弱聚焦以及相位穩定)在該中央加速平面的特殊區域中來設計該磁場的形狀。

被界定在該鐵磁鐵質磁軌 36 之中的多條徑向通道 154 會在該同步迴旋加速器的中央平面 18 上提供近接作用。該等中央平面通道 154 係用於射束抽出以及用於侵入共振器內部導體 186 與共振器外部導體 188(參見圖 5)。用於近接該磁極間隙中的離子加速結構的一替代方法則係經由上軸向 RF 通道 146 以及經由下軸向 RF 通道 148。

該冷質結構與低溫恆溫器(圖中並未顯示)包含供引線、冷卻劑、結構性支撐體使用以及用於進行真空抽吸作用的數個侵入體，而該些侵入體則會經由上磁極低溫恆溫器通道 150 以及下磁極低溫恆溫器通道 152 被設置在該鐵磁核心與磁軌 36 之內。該低溫恆溫器係由一非磁性材料所構成(舉例來說，一 INCONEL 以鎳為主的合金，其可購自位於美國西維吉尼亞州亨廷頓市的 Special Metals Corporation)。

該鐵磁鐵質磁軌 36 包括一磁性電路，其會將由該等超導線圈 12 與 14 所產生的磁通量攜載至該加速室 46。穿過磁軌 36 的該磁性電路還會在上磁極尖端 102 處以及在下磁極尖端 104 處為同步迴旋加速器微弱聚焦進行磁場塑形。該磁性電路還會因包含該磁性電路之外部件的大部份磁通量而增強該加速室之中的磁場位準，其包含下面的鐵磁磁軌元件：具有對應的下磁極根 108 的上磁極根 106；以及具有對應的下迴轉磁軌 112 的上迴轉磁軌 110。該鐵

磁磁軛 36 係由一鐵磁性物質所製成，該物質即使已經飽合仍會在用於離子加速的加速室 46 之中提供磁場塑形作用。

該等上磁鐵低溫恆溫器腔 118 以及下磁鐵低溫恆溫器腔 120 含有該等上超導線圈 12 與下超導線圈 14 以及位於該等線圈周圍的超導冷質結構與低溫恆溫器(圖中並未顯示)。

針對為一給定的 E 、 Q 、 M 、以及 V_0 來定標一新的同步迴旋加速器軌道解答來說，當 B_0 大幅地提升時，該等線圈 12 與 14 的位置與形狀同樣非常重要。上線圈 12 的底表面 114 會面向底線圈 14 的反向頂表面 116。上磁極翼 134 會面向上線圈 12 的內表面 61；而同樣地，下磁極翼 136 則會面向下線圈 14 的內表面 62。

若沒有額外屏蔽的話，(該高磁場超導同步迴旋加速器內或是該鐵磁磁軛 36 外表面附近的)該等集中高磁場位準便會經由磁吸引或磁化效應而對鄰近的人員與設備造成潛在危險。可使用一由鐵磁材料所製成的整合外部屏蔽 60(其尺寸已針對所需要的磁場位準整體外部縮減來加以設計)來最小化源自該同步迴旋加速器的磁場。該屏蔽 60 可能具有多層的形式，或是可能具有一旋繞表面以達額外的局部遮蔽作用，而且可能具有多條通道供同步迴旋加速器使用以及供與該迴旋加速器遠離的最終外部射束傳輸系統使用。

同步迴旋加速器係圓形等級粒子加速器的一員。圓形

粒子加速器的射束理論已經發展的非常完整，其係以下面兩項關鍵概念為主：平衡軌道以及繞著平衡軌道所進行的貝它振盪。平衡軌道(EO)的原理可描述如下：

- 經由一磁場所捕獲的一具有給定動量的電荷會錄寫一軌道；
- 封閉軌道代表該給定電荷、動量、以及能量的平衡狀態；
- 可分析該磁場的穩定性，以便攜載一組平滑的平衡軌道；以及
- 加速可被視為係從一平衡軌道轉移至另一平衡軌道。

而微擾理論的微弱聚焦原理則可描述如下：

- 該等粒子會繞著一平均軌道(亦被稱為中線)來進行振盪；
- 振盪頻率(v_r , v_z)會分別特徵化徑向方向(r)以及軸向方向(z)的運動；
- 該磁場會被分解成座標磁場分量以及一磁場指數(n)，且 $v_r = \sqrt{1-n}$ ，而 $v_z = \sqrt{n}$ ；以及
- 粒子振盪之間的共振以及該等磁場分量，尤其是磁場誤差項，會決定加速穩定性與損失。

於同步迴旋加速器中，上述的微弱聚焦磁場指數參數 n 的定義如下：

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

其中， r 為該離子(Q, M)與主軸線 16 的相隔半徑；而

B 為在該半徑處的軸向磁場的大小。在整個加速室中，該微弱聚焦磁場指數參數 n 的範圍係從零至一(可能的例外係該加速室中接近該主中央軸線 16 的中央區域處，離子會於該處被引入且該處的半徑趨近於零)，以便在該同步迴旋加速器中將離子成功地加速至完全能量處，其中，由該等線圈所產生的磁場會掌控該磁場指數。明確地說，再加速期間會提供一回復作用力，用以保持該等離子穩定地繞著該平均軌道來進行振盪。吾人可以看出，當 $n > 0$ 時，此軸向回復作用力便會存在，且其要求 $dB/dr < 0$ ，因為 $B >$ 且 $r > 0$ 為真。該同步迴旋加速器的磁場會隨著半徑而縮減，以便匹配加速所需的磁場指數。或者，倘若該磁場指數係已知的話，吾人便可相當精確地指定一含有眾多特徵之定位與位置的電磁電路，如圖 2 中所示，在該些位置處進行更詳細的軌道與磁場計算便能夠提供一最佳的解答。利用現成的解答，接著便能夠讓該解答適配於一參數組 (B_0 、 E 、 Q 、 M 、以及 V_0)。

就此來說，於該同步迴旋加速器之磁場中旋轉的離子的旋轉頻率 ω 為

$$\omega = QB / \gamma M$$

其中， γ 為粒子質量隨著頻率提高而增加的相對係數。一同步迴旋加速器之中隨著能量增加而降低頻率便係圓形粒子加速器的同步迴旋加速器加速模式的基礎，而且除了軸向回復作用力所需要的磁場指數變化之外，還會造成隨著半徑而額外降低磁場。跨越該間隙的電壓 V 會大於用以

提供相位穩定所需的最小電壓 V_{\min} ，該等粒子在該間隙處會具有一能量，用以讓它們在跨過下一個間隙時會獲得更多能量。此外，同步迴旋加速器加速還牽涉到相位穩定性原理，其特徵為，可用的加速電壓幾乎總是會超過用於從該加速器中心至接近外側邊緣之完全能量的離子加速所需的電壓。當該離子的半徑 r 縮減時，加速電場便必須提高，因此，伴隨著磁場 B 增加的加速電壓實際上可能會有極限。

對一給定已知、可運作的高磁場同步迴旋加速器參數組來說，可利用磁場指數 n (就其本身來說，可取決自前述的原理效應) 來推知用於加速的磁場中的徑向變化。此「 B 相對於 r 」的曲線可藉由下面方式來進一步參數化：將該資料組中的磁場除以在完全能量處所需的實際磁場數值，以及將此「 B 相對於 r 」資料組中對應的半徑數值除以會達到完全能量的半徑。接著便可利用此經正規化的資料組來適配於一更高中央磁場 B_0 處的同步迴旋加速器加速解答，而且倘若下面亦至少成立的話便會促成整體加速器縮小的效果：(a) 加速諧振數 h 為常數，其中，諧振數所指的係該磁場中的加速電壓頻率 ω_{RF} 與離子旋轉頻率 ω 之間的倍數，其關係如下，

$$\omega_{RF} = h \omega ;$$

以及 (b) 每此循環的能量增益 E_i 會被限制在讓 E_i 與另一係數的比例保持恆定，明確地說，其關係如下：

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

其中， $f(\gamma) = \gamma^2 (1 - 0.25(\gamma^2 - 1))$ 。

下文將進一步探討超導線圈的特性，以便進一步利用超導線圈來開發出一更高磁場的同步迴旋加速器。可在超導線圈中使用數個不同種類的超導體；且於眾多重要的工程解答係數之中，通常會使用下面三項係數來特徵化超導體：磁場、電流密度、以及溫度。讓超導狀態維持在一特定實用工程電流密度 J_c 以及運作溫度 T_{op} 處時，該等線圈中的超導電線的超導絲中可支援的最大磁場為 B_{max} 。為達對照的目的，磁鐵中的超導線圈(例如針對超導同步迴旋加速器所提出的超導線圈，尤其是本文所討論的高磁場同步迴旋加速器中提出的超導線圈)經常會使用 4.5K 的運作溫度 T_{op} 。為達對照的目的， $1000A/mm^2$ 的工程電流密度 J_c 係合理的代表值。不過，運作溫度與電流密度的真實範圍均大於前述數值。

超導材料 NbTi 係用於超導磁鐵之中且可在 $1000A/mm^2$ 與 4.5K 下以高達 7 個特斯拉的磁場位準運作；而 Nb_3Sn 則可於 $1000A/mm^2$ 與 4.5K 處運作在高達約 11 個特斯拉的磁場位準處。不過，藉由被稱為次冷卻的過程亦可於超導磁鐵中維持 2K 的溫度，且於此情況中，NbTi 的效能會於 2K 與 $1000A/mm^2$ 處達到約 11 個特斯拉的運作位準；而 Nb_3Sn 則會於 2K 與 $1000A/mm^2$ 處達到約 15 個特斯拉的運作位準。實際上，吾人並未將磁鐵設計成運作在超導穩定性的磁場極限處；此外，該等超導線圈處的磁場位準還可能會高於該磁極間隙中的磁場位準，因此，實際的運作磁場位準便會更低。再者，前述兩種導體系列中特定成員之

間的細部差異會擴大此範圍，如同運作在更低的電流密度處。除了先前提出的軌道定標則之外，該等超導元件之前述已知特性的近似範圍亦能促成在一精巧型高磁場超導同步迴旋加速器中針對所希望的運作磁場位準來選擇一特殊的超導電線與線圈技術。明確地說，由 NbTi 導體與 Nb₃Sn 導體所製成且以 4.5K 運作的超導線圈的運作磁場位準範圍會從同步迴旋加速器中的低磁場至超過 10 個特斯拉的磁場。將運作溫度進一步降至 2K 則會將該範圍擴大至至少 14 個特斯拉的運作磁場位準。

超導線圈的特徵還有該繞線之中磁性作用力的位準以及必需快速消除能量，基於特定理由，該繞線的一部分在完全運作電流處會變成正常導通狀態。能量消除便係已知的磁鐵淬息。有數項因素和一超導同步迴旋加速器的分離線圈對 12 與 14 中的作用力及淬息保護有關，該些因素係針對一使用一選定導體類型之經定標的高磁場超導同步迴旋加速器所提出，以便正確地運作。如圖 4 中所示，該線圈組包含一分離線圈對，其具有上超導線圈 12 以及下超導線圈 14。該等上超導線圈 12 與下超導線圈 14 會軸向捲繞交流超導體以及絕緣元件。有數種類型與等級的超導體可以使用，它們具有不同的組成與特徵。

上超導線圈 12 中的表面 168 以及下超導線圈 14 中的表面 170 示意性表示導體等級改變的邊界，以便讓該導體與線圈設計產生最佳的匹配效果。於該些與其它位置處，可針對特殊用途引入額外的結構，例如輔助淬息保護或是

增加該繞線的結構性強度。所以，每一個超導線圈 12 與 14 均可能具有藉由邊界 168 與 170 來分開的多個區段。雖然圖 4 中顯示出三個區段，不過，這僅係其中一種實施例，實際上則可以使用較少或更多的區段。

該等上線圈 12 與下線圈 14 係位於一低溫線圈機械式包封結構內，本文中稱為捲筒 20。捲筒 20 會在徑向與軸向兩個方向中支撐且含有該等線圈 12 與 14，因為該等上線圈 12 與下線圈 14 具有極大的吸引力負載以及極大的徑向朝外作用力。該捲筒 20 會經由該等線圈 12 與 14 各別的表面 114 與 116 來為它們提供軸向支撐。為近接該加速室 46，多條徑向通道 172 係界定在該捲筒 20 之中並穿過該捲筒 20。此外，還可在該捲筒 20 上提供多個附接結構(圖中並未顯示)，以便賦予徑向連結作用，用以將該線圈/捲筒裝配件固定在一正確的位置處。

上超導線圈 12 中的位置點 156 以及下超導線圈 14 中的位置點 158 所示的係最高磁場的近似區域；且此磁場位準會為選定的超導體來設定該設計點，其討論如上。此外，上超導線圈 12 中的劃線區域 164 以及下超導線圈 14 中的劃線區域 166 所示的係磁場反向的區域；且於前述情況中，該等繞線上的徑向作用力會朝內且將會降低。區域 160 與 162 所示的係低磁場或接近零整體磁場位準的地帶，且該等地帶具有最大的淬息阻力。

該精巧型高磁場超導迴旋加速器包含用於相位穩定加速的元件，該等元件顯示在圖 5 至 8 中。圖 5 與 6 提供的

係針對圖 1 之 9.2 個特斯拉解答的其中一種射束加速結構類型的細部工程佈局，其具有一射束室 176 以及共振器 174，其中，該射束室 176 係位於該磁極間隙空間之中。圖 5 的正視圖顯示出，該等 D 形物 48 中僅有其中一者係用於加速該等離子；而側面圖則顯示出，此 D 形物 48 在該中央平面的上面與下面會被分開，用以讓該射束於加速期間通過進入。該 D 形物 48 與該等離子係位於一處於真空下且由該射束室 176 來界定的體積之中，該體積包含一射束室基底平板 178。加速間隙界定隙孔 180 會建立電接地平面。在 D 形物 48 與該加速間隙接地平面界定隙孔 180 之間，該等離子會藉由跨越該加速間隙 180 之間的電場而被加速。

為跨越間隙 182 建立所希望的高磁場，該等 D 形物 48 會經由 D 形物-共振器連接器 184 被連接至一共振器內部導體 186 以及被連接至一共振器外部導體 188。該外部共振器導體 188 會被連接至該高磁場同步迴旋加速器的低溫恆溫器 200(如圖 9 中所示)，其具有一由該連接線所保持的真空邊界。該共振器頻率係藉由一 RF 旋轉電容器(圖中並未顯示)來改變，該電容器會經由穿過耦接埠 192 的共振器外部導體迴轉磁軌 190 被連接至該加速 D 形物 48 以及該等內部導體 186 與外部導體 188。電力會經由 RF 傳送線耦接埠 194 被傳送至該 RF 共振電路。

於另一實施例中，會在該精巧的高磁場超導同步迴旋加速器之中併入一具有兩個 D 形物與軸向 RF 共振器元件

的替代結構，如圖 9 中概略所示。此一雙 D 形物系統可提高加速速率或是降低電壓 V_0 。因此，本實施例會用到兩個 D 形物 48 與 49；該等 D 形物 48 與 49 會在該中央平面的兩側被分成兩半，並且由上軸向共振器 195 與 196 以及下軸向共振器 197 與 198 來提供能量，(除了經由通道 154 的徑向電力饋送之外，如圖 2 中所示)該等軸向共振器則會由外部 RF 電源來提供能量。圖 9 還顯示出如何將一線圈低溫恆溫器 200 適配於該鐵磁磁軛結構 36 之中。

在圖 10 與 11 中所示的係用於粒子加速的一磁鐵結構 10 的更完整與詳細圖式。舉例來說，該磁鐵結構 10 可用於一精巧的同步迴旋加速器之中(舉例來說，用在共有美國專利案第 4,641,057 號中所揭示之同步迴旋加速器之特點的同步迴旋加速器之中)，用於一等時迴旋加速器之中，以及用於可對離子(例如質子、氘核、阿爾法粒子、以及其它離子)進行加速的其它類型迴旋加速器之中。

於更寬廣的磁性結構內，係由一包含該對圓形線圈 12 與 14 的冷質結構 21 來產生高能量磁場。如圖 12 中所示，該對圓形線圈 12 與 14 係被安置在位於真空中的個別銅質熱屏蔽 78 內部，在該等線圈 12 與 14 以及該銅質熱屏蔽 78 之間會有緊密的機械性接觸。同樣被安置在每一個銅質熱屏蔽 78 之中的係一加壓囊 80，其會施加一徑向朝內的作用力，用以抵消於運作期間作用在每一個線圈 12/14 之上非常高的環形拉伸作用力。該等線圈 12 與 14 係以在該等離子可被加速的一加速平面 18 上面與下面等距的方式以

一中央軸線 16 為中心來對稱排列。該等線圈 12 與 14 會分隔一足夠的距離，以便讓該 RF 加速系統在其間延伸至該加速室 46 之中。每一個線圈 12/14 均包含一由導體材料製成的連續路徑，該導體材料在經設計的運作溫度下(其範圍通常為 4 至 6K，不過，亦可運作在 2K 以下)會呈現超導狀態，於該運作溫度處會達到額外的超導效能與邊限。每一個線圈的半徑均約為 17.25 英吋(~43.8cm)。

如圖 13 中所示，該等線圈 12 與 14 包括超導體纜線或通道中纜線(cable-in-channel)導體，其具有直徑 0.6mm 的纜線絞線 82 以及並且會被捲繞以提供介於 2 百萬至 3 百萬總安匝之間的電流攜載容量。於一實施例中，每一條纜線絞線 82 的超導電流攜載容量為 2,000 安培，在該線圈中設置著 1,500 條該等絞線繞線，用以在該線圈中提供 3 百萬安匝的容量。一般來說，該線圈將會被設計成具有眾多繞線，用以產生一所希望磁場位準所需要的安匝數，而不會超過該超導絞線的關鍵電流攜載容量。該超導材料可為一低溫超導體，例如 鈮鈦(NbTi)、鈮三錫(Nb₃Sn)、鈮三鋁(Nb₃Al)；於特殊的實施例中，該超導材料係第 II 型超導體—明確地說，具有 A15 晶體結構的 Nb₃Sn。亦可使用高溫超導體，例如 Ba₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈、Ba₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀、或是 YBa₂Cu₃O_{7-x}。

該等纜式絞線 82 會被焊接至一 U 形銅質通道 84，以便形成一合成導體 86。該銅質通道 84 會在淬息期間提供機械性支撐、熱穩定性；以及在該超導材料為常態時(也就

是，非超導)提供一供電流使用的導體路徑。接著，便會將該合成導體 86 纏繞在玻璃纖維中並且接著捲繞在一朝外的繼電器之中。由不鏽鋼所構成的帶狀加熱器 88 亦可被插置在該合成導體 86 的多層捲繞層之間，以便在淬息該磁鐵時進行快速加熱，並且還會在已經進行淬息之後於該線圈的徑向剖面上提供溫度平衡，以便最小化可能會破壞該等線圈的熱應力與機械應力。於捲繞之後便會施以真空，且該經捲繞的合成導體結構會被注入環氧樹脂，用以在最終的線圈結構中形成一纖維/環氧樹脂合成填充劑 90。所生成的環氧樹脂-玻璃合成物(其中內嵌著該經捲繞的合成導體 86)會提供電絕緣與機械剛性。由環氧樹脂-被注入玻璃纖維所構成的捲繞絕緣層 96 會作為該銅質熱屏蔽 78 內部的襯裡並且包圍線圈 12。

於建構 Nb_3Sn 用於迴旋加速器之中的一實施例中，該線圈係藉由將一經捲繞的錫質電線絞線裝進一鈮粉末母體之中而構成的。接著便會將該經捲繞的絞線以及母體加熱至約 $650^{\circ}C$ 的溫度，保持 200 個小時，用以讓該等錫質電線與該鈮質母體進行反應，並且從而形成 Nb_3Sn 。在經過此熱處置之後，該纜線中的每一條 Nb_3Sn 絞線均必須攜載總電流的一部份，其在運作磁場與溫度處會具有足夠的電流邊限，以保持該超導狀態。該銅質通道剖面與環氧樹脂合成母體的規格會讓該高磁場線圈於發生在此等精巧線圈中的更大機械應力下維持其超導狀態。此改良的尖峰應力遷移亦非常有利於該線圈運作在更高的電流密度處用以提

高所產生的磁場，其會伴隨著作用在該等超導線圈上的更大作用力。除非所有運作中的應力狀態受到正確的限制，否則， Nb_3Sn 導體非常易碎且可能會受到破壞並且會喪失特定的超導功能。在該捲繞與反應法後面接著於該等繞線上形成一環氧樹脂-合成物機械結構便可讓該些 Nb_3Sn 線圈使用在要使用到超導體或可使用超導體的其它應用中，否則，便可能會因先前實施例中標準 Nb_3Sn 線圈的易碎性而無法適用於該些應用之中。

該等銅質屏蔽(其中內含該等線圈 12 與 14)係被安置在一由高強度合金所構成的捲筒 20 之中，舉例來說，該高強度合金包括不鏽鋼或奧氏體(austenitic)鎳-鉻-鐵合金(市售的 INCONEL 625，可購自位於美國西維吉尼亞州亨廷頓市的 Special Metals Corporation)。該捲筒 20 會侵入該等線圈 12 與 14 之間，而其它部份則係位於該等線圈 12 與 14 外面。該捲筒 20 中位於該等線圈外面的頂端部份與底部部份(依照圖 12 的定向)的厚度(於水平方向中所測得者，依照圖 12 的定向)約等於該線圈 12/14 的厚度。冷質結構 21(其包含該等線圈 12 與 14 以及該捲筒 20)會被裝進一絕緣且被抽成真空的不鏽鋼或鋁質殼體 23 之中，稱為低溫恆溫器，其可被安置在該鐵質磁極與磁軛 36 的內部。該冷質結構 21 會限定(也就是，至少部份界定)一供用於加速離子的加速室 46(參見圖 11)使用的空間以及延伸跨越該加速室 46 的中央軸線 16 的一區段。

如圖 11 中所示，該磁鐵結構 10 還包含一條包圍著每

一個線圈 12/14(也就是，螺旋圍繞該線圈，圖 11 中僅顯示出一小部份)的導電線 24(舉例來說，其具有纜線的形式)，用以該線圈 12/14 因溫度升高而進入「常態」時來對其進行淬息。還有一電壓或電流感測器會耦接該等線圈 12 與 14，用以監控任一線圈 12/14 中的電阻是否提高，藉以表示該線圈 12/14 的其中一部份已經不再為超導狀態。

如圖 10 中所示，低溫冷卻器 26(其可於一 Gifford-McMahon 製冷循環中使用壓縮氦氣，或者其亦可具有脈衝管低溫冷卻器設計)會與該冷質結構 21 產生熱耦接。該耦接的形式可為一與該線圈 12/14 產生接觸的低溫超導體(舉例來說，NbTi)電流引線。該等低溫冷卻器 26 能夠將每一個線圈 12/14 冷卻至使其呈現超導狀態的溫度。據此，每一個線圈 12/14 於運作期間均可被維持在一乾燥的狀況中(也就是，並未被浸沒在液體氦或是其它液體製冷劑之中)，而且於該冷質結構 21 之中或附近亦不需要提供任何液體冷卻劑來冷卻該冷質或是供該等超導線圈 12/14 運作。

一第二對低溫冷卻器 27(其可能與低溫冷卻器 26 具有相同或類似的設計)會將電流引線 37 與 58 耦接至該等線圈 12 與 14。高溫電流引線 37 係由一高溫導體所構成，例如 $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ 或是 $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ，而且在一末端處會被該等低溫冷卻器 27 之第一級之末端處的冷頭 33 冷卻，該等冷頭的溫度約為 80K；在它們的另一末端處則會被該等低溫冷卻器 27 之第二級之末端處的冷頭 35 冷卻，該等冷頭的溫度約為 4.5K。該等高溫電流引線 37 還會導電耦

接一電壓源。低溫電流引線 58 會耦接該等高溫電流引線 37，用以提供一路徑供電流流動；而且還會耦接該等低溫冷卻器 27 之第二級之末端處的冷頭 35，用以將該等低溫電流引線 58 冷卻至約 4.5K 的溫度。每一條該等低溫電流引線 58 還包含一被附接至一個別線圈 12/14 的電線 92；而一第三電線 94(其同樣係由一低溫超導體所構成)則會串聯耦接該等兩個線圈 12 與 14。每一條該等電線均可被固接至該捲筒 20。據此，電流便能夠從一擁有一電壓源的外部電路，經由該等高溫電流引線 37 中的第一者流至該等低溫電流引線 58 中的第一者並且進入線圈 12；接著，該電流便能夠流經線圈 12 並且經由接合該等線圈 12 與 14 的電線離開。接著，該電流便會流經線圈 14 且經由第二低溫電流引線 58 的電線離開，向上流經該低溫電流引線 58，接著流經第二高溫電流引線 37 並且流回到該電壓源。

低溫冷卻器 29 與 31 可用以操作遠離致冷冷卻液體源的磁鐵結構，例如位於隔離的處置房中或是同樣位於移動平台上。該對低溫冷卻器 26 與 27 允許僅使用具有正確功能的每一對低溫冷卻器中的其中一者來操作該磁鐵結構。

至少一真空唧筒(圖中並未顯示)會透過共振器 28 來耦接該加速室 46，其中還會置入一用於該 RF 加速器電極的電流引線。該加速室 46 其它部份則會被密封，以便在該加速室 46 之中產生真空。

徑向拉張連接線 30、32、34 會耦接該等線圈 12 與 14 以及捲筒 20，其配置可藉以讓該等徑向拉張連接線 30、32、

34 於複數個位置點處在該捲筒 20 上提供一朝外的環形作用力，以便將該捲筒 20 放置在徑向朝外的張力中並且保持該中央軸線 16 位於該等線圈 12 與 14 的中央(也就是，該等線圈 12 與 14 會實質對稱於該中央軸線 16)。因此，該等拉張連接線 30、32、34 會提供徑向支撐以抵消磁性偏心力，俾使正在其中一側接近該鐵材的冷質會看見一以指數方式上升的作用力並且會更接近該鐵材。該等徑向拉張連接線 30、32、34 包括二或更多個彈性拉張鬆緊帶 64 與 70，它們具有藉由線性區段(舉例來說，近似的形狀為習知的賽道或跑道)來接合的圓頭末端並且具有一正圓形剖面。舉例來說，該等鬆緊帶係由螺旋捲繞玻璃或充滿環氧樹脂的碳質捲帶所構成，並且會被設計成用以最小化從高溫外框至低溫線圈 12 與 14 的熱傳輸。一低溫鬆緊帶 64 係延伸在支撐栓 66 與支撐栓 68 之間。低溫支撐栓 66(其會耦接捲筒 20)係約 4.5K 的溫度，而中間支撐栓 68 則係約 80K 的溫度。一高溫鬆緊帶 70 係延伸在該中間支撐栓 68 與一高溫支撐栓 72(其係位於約 300K 的近環境溫度處)之間。可於該高溫支撐栓 72 處施加一朝外作用力，用以在任何該等拉張連接線 30、32、34 處施加額外的張力，以便在有各種偏心力作用於該等線圈 12 與 14 之上時來維持置中效果。該等支撐栓 66、68、以及 72 可由不鏽鋼所構成。

同樣地，亦可沿著一垂直軸線(依照圖 10 與 12 的定向)將類似的拉張連接線附接至該等線圈 12 與 14，用以抵消

一軸向磁性偏心作用力，以便讓該等線圈 12 與 14 的位置維持對稱於該中間平面 18。於運作期間，雖然該等線圈 12 與 14 之間的厚捲筒 20 區段會減弱該等線圈 12 與 14 之間的吸力，不過，該等線圈 12 與 14 仍會強烈地相互吸引。

該組徑向與軸向拉張連接線除了會提供必要的集中作用力之外，還會抵消重力以支撐該等線圈 12 與 14 以及捲筒 20 的質量。該等拉張連接線的尺寸可經過設計用以讓整個磁鐵結構以規定的速率來進行平滑或階梯式的三維平移或旋轉運動，例如用以將該磁鐵結構安置在一起重架、平台、或是車輛上，以便讓一房間中的質子射束繞著一固定的目標照射位置移動。重力支撐以及運動需求均係未超過該等磁性偏心作用力的拉張負載。該等拉張連接線的尺寸可經過設計用以反覆移動超過許多移動循環以及移動年。

一由低碳鋼所構成的磁軛 36 會包圍該等線圈 12 與 14 以及低溫恆溫器 23。純鐵可能太脆弱且其彈性模數亦可能過低；因此，可利用足量的碳以及其它元素來摻雜鐵，以便提供足夠的強度或是降低其剛性，同時又能維持所希望的磁性位準。磁軛 36 會限定由該等線圈 12 與 14 以及低溫恆溫器 23 所限定的中央軸線 16 的相同區段。位於磁軛 36 之外表面處的半徑(從該中央軸線處所測得者)可能約為 35 英吋(~89cm)甚至更小。

磁軛 36 包含具有漸細內表面 42 與 44 的一對磁極 38 與 40，該等漸細內表面會在該等磁極 38 與 40 之間且跨越

該加速室 46 界定一磁極間隙 47。該些漸細內表面 42 與 44 的輪廓會與該等線圈 12 與 14 的位置具有函數關係。該等漸細內表面 42 與 44 的形狀會經過設計俾使當與該中央軸線 16 的相隔距離增加時，該磁極間隙 47(如利用圖 10 中的基準線所示而測得者)會於界定在兩側表面 42 之間的一內部級上方擴大；而且當與該中央軸線 16 的相隔距離進一步增加時，該磁極間隙 47 則會於界定在兩側表面 44 之間的一外部級上方縮小。當用在用於質子加速的一同步迴旋加速器之中時，該內部級會建立一用於離子(舉例來說，質子)加速的正確微弱聚焦必要條件，而該外部級則會被配置成用以相對於半徑來提高能量增益以縮小磁極直徑，其有助於在離子接近該加速室 46 的周圍時從該同步迴旋加速器中抽出該等離子。

上述的磁極輪廓具有數項重要的加速功能，換言之具有下面功能：於低能量時在該機器中心進行離子導向；捕獲進入穩定的加速路徑之中；加速；軸向與徑向聚焦；射束品質；射束損失最小化；達成最終所希望的能量與強度；以及定位最終射束位置以進行抽出。明確地說，於同步迴旋加速器之中，可同時達到微弱聚焦以及加速相位穩定的目的。於此磁鐵結構中所達到的較高磁場處，在該第一級上方擴大該磁極間隙會提供足夠的微弱聚焦以及相位穩定性，而快速地封閉該外部級上方的間隙則係為抗衡該等強烈超導線圈的不利效應以保持微弱聚焦，同時正確地將該完全能量射束定位在該磁極邊緣附近，以便將其抽出至該

抽出通道之中。於要由該磁鐵來產生的磁場提高的實施例中，該間隙開口隨著該內部級上方的半徑增加而擴大的速率會變大，而該間隙則會於該外部級上方封閉至一較窄的分隔距離處。因為該等磁極中的鐵在 2 個特斯拉以上的磁極強度處會完全磁性飽合，所以，藉由以該加速室中的一額外的巢式超導線圈 206 組(舉例來說，在至少 4.5K 之溫度時會呈現超導狀態)來取代該等磁極之該等漸細表面並且對該些巢式線圈中的電流進行最佳化以匹配該等磁極對總加速磁場的磁場貢獻，便可達成此組同步的目標，如圖 16 中所示。

該徑向分佈的線圈 206 可被埋置在磁軛 36 之中或是安置(舉例來說，栓鎖)在磁軛 36 之上。該額外的超導線圈 206 中至少一者會在該等兩個主超導線圈 12 與 14 的局部反向位置處產生一磁場。於此實施例中，磁軛 36 同樣會被冷卻(舉例來說，藉由一或多個低溫冷卻器來進行)。圖中雖然並未顯示，不過，可經由該等徑向中央平面通道 154 來提供一絕緣結構，讓該加速室內含於此絕緣結構內，俾使該加速室可維持在一暖和的溫度下。藉由讓電流在和該等主線圈 12 與 14 之中通過的電流相反的方向流過該等額外的磁線圈 206 便會在該等內部線圈 206 之中產生反向磁場。於該加速室之中使用該等額外的作用線圈 206 可特別有利於加速平面 18 中的磁場大於 12 個特斯拉且因而需要進行更大的磁場補償以隨著半徑來降低磁場且同時又能維持微弱聚焦與相位穩定的情況。該等更高磁場磁鐵結構會

具有更小的外徑。舉例來說，一用於在該中央加速平面 18 中產生 14 個特斯拉的磁場的磁鐵結構可利用一外徑略大於一英尺(也就是，略大於 30cm)的磁軛建構而成。

於其它實施例中，則可省略該磁軛 36，且該磁場可完全由超導線圈 12、14、以及 206 來產生。於另一實施例中，磁軛 36 中的鐵則可置換成另一種強鐵磁材料，例如，釷，其具有特別高的飽和磁力(舉例來說，高達約 3 個特斯拉)。

該鐵材磁軛會提供足夠的空間供插置一含有該等射頻(RF)加速器電極 48(亦稱為「D 形物」)的共振器結構 174，該等電極係由一導體金屬所構成。該等電極 48 係一共振器結構 174 的一部份，該共振器結構 174 會延伸穿過該磁軛 36 的側邊並且通過低溫恆溫器 23 並且通過該等線圈 12 與 14 之間。該等加速器電極 48 包含一對平坦的半圓平行板，它們係被定向成平行於該加速室 46 內的加速平面 18 且被定向在該加速平面 18 的上方與下方(如美國專利案第 4,641,057 號中所述與所示者)。該等電極 48 會耦接一 RF 電壓源(圖中並未顯示)，該 RF 電壓源會產生一振盪電場，用以在該加速室 46 中的一擴展軌道(螺旋)路徑中來加速從離子源 50 處射出的離子。此外，還可以被定向在該中央軸線 16 之平面(也就是，一以圖 10 之方向與中央軸線相交且自該頁面中垂直延伸出來的平面)中的一平面薄板的形式來提供一仿真 D 形物，並且會於其中界定一狹縫用以容納該用於該等粒子的加速平面。或者，雖然該仿真 D 形物係耦接一電接地而非耦接一電壓源，不過，該仿真 D 形物亦

可能具有和該等電極 48 之配置完全相同的配置。

一整合磁屏蔽 52 會限定該磁鐵結構 10 的其它組件。該整合磁屏蔽 52 的形式可為一由低碳鋼所製成的很薄的薄板(舉例來說，厚度為 2cm)。如圖 10 中所示，可在選定位置處將多個薄板堆疊在一起，用以提供額外的敏感區遮蔽效果，從該等薄板沿著圖 10 中的側邊進行三重堆疊便可明白。或者，該屏蔽 52 亦可具有一扭曲的形狀(舉例來說，類似一崩毀的手風琴結構)，如圖 14 與 15 中所示，並且會被配置成用以讓由該等線圈 12 與 14 以及由磁軌 36 所產生的大部份磁場必須在複數個位置處以及在與該屏蔽 52 之局部定向所形成的複數個角度處通過該整合磁屏蔽 52。於圖 14 的實施例中，在該整合磁屏蔽 52 的輪廓中，其方向會在垂直於源自該中央軸線 16 之徑向向量 56 以及平行於源自該中央軸線 16 之徑向向量 56 之間逐漸地來回移動。每一個徑向向量 56 均會在二或更多個不同位置處(其包含一近垂直角以及一近正切角)與該屏蔽 52 相交。在第一相交點 74 處，向量 56 會在一近垂直位置處跨越該整合磁屏蔽 52，一垂直的磁場分量會被消除；而在第二相交點處，向量 56 則會在一近正切位置處跨越該整合磁屏蔽 52，一正切的磁場分量會被消除。

該整合磁屏蔽 52 係被安置在與該磁軌 36 之外表面相隔一距離處，俾使當一電壓被施加至該等超導線圈 12 與 14 而在該加速室 46 內產生一 8 個特斯拉甚至更大的磁場時，其會被定位在該磁軌 36 外面所產生的一 1,000 高斯磁通量

密度的等高線外面。據此，該整合磁屏蔽 52 便會被定位在與該磁軌 36 相隔夠遠的位置處，俾使其不會被該磁場完全磁化，且其會用以抑制可從該磁鐵結構 10 射出的遠磁場。

該等低溫冷卻器 26 與 27 的頭部 29 與 31 係被定位在該整合磁屏蔽 52 的外面，用以遮蔽該等頭部 29 與 31，讓它們不會受到磁場影響(此可能會因該等頭部 29 與 31 中的磁場極限而損及該低溫冷卻器的運作能力)。據此，該整合磁屏蔽 52 會於其中界定個別的埠，以便可經由該等埠來插置該等低溫冷卻器 26 與 27。

現在將於後頁中說明操作上述的磁鐵結構 10 以便產生一用於加速離子的磁場。

當該磁鐵結構 10 在運作時，該等低溫冷卻器 26 會用來從該等超導線圈 12 與 14 中將熱抽出，以便將每一者的溫度降至其臨界溫度(其會在該溫度下呈現超導性)以下。由低溫超導體所構成的線圈的溫度會降至約 4.5K。

一電壓(在上述於該線圈中具有 1,500 次繞線的實施例中，足以產生 2,000A 的電流流經該電流引線)會透過電流引線 58 被施加至每一個線圈 12/14，用以於該等線圈為 4.5K 時在該加速室 46 內產生至少 8 個特斯拉的磁場。於使用 Nb_3Sn 的特殊實施例中，一電壓會被施加至該等線圈 12 與 14，用以在該加速室 46 內產生至少約 9 個特斯拉的磁場。再者，如上面所討論者，藉由使用該等低溫冷卻器來將該線圈溫度進一步降至 2K，通常可額外提高 2 個特斯拉的磁

場。該磁場中約有 2 個特斯拉係由該等被完全磁化的鐵材磁極 38 與 40 所貢獻；而其餘的磁場則係由該等線圈 12 與 14 所產生。

此磁鐵結構係用來產生一足以用於離子加速的磁場。離子(舉例來說，質子)脈衝可由該離子源 50(舉例來說，美國專利案第 4,641,057 號中所述與所示的離子源)處射出。舉例來說，藉由施加一電壓脈衝至一陰極，用以讓電子從該陰極處被釋放至氫氣之中便可產生自由質子；其中，當該等電子與該等氫氣分子產生碰撞時便會射出質子。

於此實施例中，該等 RF 加速器電極 48 會跨越該等平板產生一 20,000 伏的電壓差。由該等 RF 加速器電極 48 所產生的電場的頻率會與要被加速的離子的迴旋加速器軌道頻率的頻率一致。當該等離子最靠近該中央軸線 16 時，由該等 RF 加速器電極 48 所產生的電場便會在 140MHz 的頻率下產生振盪；而當該等離子最遠離該中央軸線 16 且最靠近該加速室 46 之周圍時，該頻率便會降至 100MHz 的低頻。當該質子被加速時，該頻率會下降以補償該質子的質量增加，因為該等電極 48 處的交流頻率會交替地吸引與排斥該等離子。當該等離子因而在它們的軌道中被加速時，該等離子便會增速並且螺旋朝外。

當該等被加速離子抵達該加速室 46 中的一外徑軌道時，該等離子便可(以一脈衝射束的形式)被抽出至該加速室 46 的外面，其方式係：利用位於該加速室 46 周圍附近的磁鐵以磁性的方式來引導該等離子進入經由磁軌 36 從

該加速室 46 延伸出來的一線性射束抽出通道 60 之中，並且接著會經過該整合磁屏蔽 52 中的一間隙朝一外部目標移動。該等徑向拉張連接線 30、32、34 會被啟動用以於該冷質結構 21 上賦加一朝外的徑向環形作用力，以便於整個加速過程中維持其正確位置。

該整合磁屏蔽 52 含有由該等線圈 12 與 14 以及磁極 38 與 40 所產生的磁場，以便降低伴隨著將筆、紙夾、以及其它金屬物體吸引至該磁鐵結構 10 而造成的外部危險，當未採用該整合磁屏蔽 52 時便會發生該等危險。當垂直磁場以及正切磁場兩者均由該磁鐵結構 10 產生時且用於容納每一者的最佳屏蔽方向相差 90° 時，該等磁場線與該整合磁屏蔽 52 之間於各角度處的交互作用便非常地有利。此屏蔽 52 能夠將經由該屏蔽 52 被傳送至該磁軌 36 外面的磁場的強度限制在小於 0.00002 個特斯拉處。

當偵測到電壓升高或流經一線圈 12/14 的電流下降時，其便表示該超導線圈 12/14 的一局部部份已經不再具有超導性，因而便會施加一足夠的電壓至包圍該線圈 12/14 的淬息電線 24。此電壓會產生一流經該電線 24 的電流，其因而為該線圈 12/14 中的個別導體產生一額外的磁場，該磁場會讓它們始終保持非超導(也就是，「常態」)。此方式係解決一已知的問題，因為每一個超導線圈 12/14 中於運作期間的內部磁場在其內表面 62 處會非常高(舉例來說，11 個特斯拉)並且會在一內部點處降至零磁場。倘若發生淬息的話，其可能會發生在一高磁場位置處，而一低

磁場位置則可能仍會在一延長週期中維持低冷溫度與超導性。此淬息會在線圈 12/14 的部份超導體中產生熱(其為正常傳導性);因此,當其溫度上升時,邊緣將會終止超導性,而該線圈的中央區域則會維持低冷溫度與超導性。所造成的熱差會因差異熱收縮而導致該線圈中的應力遭到破壞。此誘發性淬息實例的目的係防止或限制此差異,並且從而可使用該等線圈 12 與 14 來產生更高的磁場,而不會因該等應力而遭到破壞。或者,電流可流經該等加熱帶 88 讓加熱帶溫度上升至 4.5K 以上,並且從而局部性地加熱該等超導體,以便於一淬息期間最小化該等內部溫度差異。

含有上述設備的迴旋加速器可用於各種應用中,其包含:人體的質子輻射治療;蝕刻(舉例來說,微孔、濾波器、以及積體電路);材料的放射性研究;摩擦學(tribology);基礎科學探討;保全(舉例來說,在利用經加速質子來照射目標貨物時對質子散射情形進行監控);生產用於醫學與工業的醫用同位素以及追蹤器;奈米技術;尖端生物學;以及各種其它應用,其中,從一精巧型來源產生一具有高能量粒子的類點狀(也就是,小幅的空間分佈)射束會是非常有用的。

為清楚起見,於說明本發明的實施例中會用到特定的技術。為達說明的目的,每一特定用詞均希望至少包含以類似方式運作來達成類似用途的所有技術性與功能性均等用詞。此外,在本發明的一特殊實施例包含複數個系統元件或方法步驟的特定實例中,該些元件或步驟可由單一元

件或步驟來取代；同樣地，單一元件或步驟亦可由具有相同用途的複數個元件或步驟來取代。進一步言之，雖然本文中為本發明的實施例指定各項特性的參數，不過，除非特別提及，否則，在本發明的範疇內，該些參數均可上下調整 $1/20$ 、 $1/10$ 、 $1/5$ 、 $1/3$ 、 $1/2$ 、... 等，或是取捨其近似值。再者，雖然本文已經參考本發明的特殊實施例來顯示與說明本發明，不過熟習本技術的人士會瞭解，於不脫離本發明的範疇前提下，仍可對其進行形式與細節的各種置換與變更；又進一步言之，其它的觀點、功能、以及優點亦同樣落在本發明的範疇內。本申請案全篇中所引用之所有參考文獻(包含專利案以及專利申請案在內)的內容均以引用的方式被完整併入本文中。該些參考文獻的合宜組件與方法可經過篩選用於本發明與其實施例中。又進一步言之，先前技術段落中所確認的組件與方法與本揭示內容係一體的並且可在本發明的範疇內配合在本揭示內容其它地方所述之組件與方法來使用，或是替代在本揭示內容其它地方所述之組件與方法。

【圖式簡單說明】

在圖式中，所有不同圖式中相同的元件符號代表相同或類似的部件。該等圖式並未必依比例縮放，其重點在於圖解具有實施方式中所述之特徵的方法與設備的特殊原理。

圖 1 所示的係一高磁場同步迴旋加速器之基本結構的

立體剖面圖，圖中省略線圈/低溫恆溫器裝配件。

圖 2 所示的係用於該高磁場同步迴旋加速器的鐵磁材料以及磁線圈的剖面圖。

圖 3 所示的係一對鐵尖端環，其延伸自個別磁極翼且共有一共同中央方向軸線，為達更佳圖解目的，兩者之間隙係延伸在圖面中。

圖 4 所示的係該高磁場、分離對超導線圈組之特徵的剖面圖。

圖 5 所示的係該同步迴旋加速器射束室、加速 D 形物、以及共振器的剖面圖。

圖 6 所示的係圖 5 之設備的剖面圖，該剖面係沿著圖 5 中所示之縱軸所獲得者。

圖 7 所示的係貫穿圖 5 之設備中的共振器導體所獲得的剖面圖，其具有兩倍的尺寸。

圖 8 所示的係貫穿圖 5 之設備中的外迴轉磁軛(outer return yoke)所獲得的剖面圖，其具有兩倍的尺寸。

圖 9 所示的係一替代 RF 配置，該配置使用兩個 D 形物以及軸導向的 RF 埠。

圖 10 所示的係一磁鐵結構的剖面圖，其係從該磁鐵結構的中央軸線所在的平面中看去所獲得者。

圖 11 所示的係圖 10 的磁鐵結構的剖面圖，其係從正交於該中央軸線且平行於該加速平面的平面中看去所獲得者。

圖 12 所示的係冷質結構的剖面圖，其包含該等線圈與

該捲筒。

圖 13 所示的係一線圈之內部結構的剖面圖。

圖 13A 所示的係圖 13 中所示之剖面的放大圖。

圖 14 所示的係一具有一扭曲形狀之整合磁屏蔽的剖面圖。

圖 15 所示的係圖 14 的整合磁屏蔽的一剖面的立體圖。

圖 16 所示的係一磁鐵結構之基本形式的剖面圖(圖中省略特殊細節)，其在該加速室之中包含額外的作用線圈，用以設計該加速平面處之磁場的形狀。

【主要元件符號說明】

10	磁鐵結構
12	上超導線圈
14	下超導線圈
16	中央軸線
18	中央加速平面
20	捲筒
21	冷質結構
23	低溫恆溫器
24	導電線
26	低溫冷卻器
27	低溫冷卻器
28	共振器
29	低溫冷卻器

- 30 徑向拉張連接線
- 31 低溫冷卻器
- 32 徑向拉張連接線
- 33 冷頭
- 34 徑向拉張連接線
- 35 冷頭
- 36 磁軛
- 37 電流引線
- 38 磁極
- 40 磁極
- 42 漸細內表面
- 44 漸細內表面
- 46 加速室
- 47 間隙
- 48 D形物
- 49 D形物
- 50 離子源
- 52 整合磁屏蔽
- 56 徑向向量
- 58 電流引線
- 60 整合外部屏蔽
- 61 內表面
- 62 內表面
- 64 鬆緊帶

66	支撐栓
68	支撐栓
70	鬆緊帶
72	支撐栓
78	銅質熱屏蔽
80	加壓囊
82	纜線絞線
84	銅質通道
86	合成導體
88	加熱器
90	合成填充劑
92	電線
94	電線
96	絕緣層
102	上磁極尖端
104	下磁極尖端
106	上磁極根
108	下磁極根
110	上迴轉磁軛
112	下迴轉磁軛
114	底表面
116	頂表面
118	上磁鐵低溫恆溫器腔
120	下磁鐵低溫恆溫器腔

- 122 上磁極尖端等高線
- 124 下磁極尖端等高線
- 126 上磁極等高線
- 128 下磁極等高線
- 130 上磁極等高線
- 132 下磁極等高線
- 134 上磁極翼
- 136 下磁極翼
- 138 尖端
- 140 尖端
- 142 上中間通道
- 144 下中間通道
- 146 上軸向 RF 通道
- 148 下軸向 RF 通道
- 150 上磁極低溫恆溫器通道
- 152 下磁極低溫恆溫器通道
- 154 徑向通道
- 156 最高磁場的近似區域
- 158 最高磁場的近似區域
- 160 區域
- 162 區域
- 164 區域
- 166 區域
- 168 表面

- 170 表面
- 172 徑向通道
- 174 共振器結構
- 176 射束室
- 178 射束室基底平板
- 180 加速間隙界定隙孔
- 182 間隙
- 184 D形物-共振器連接器
- 186 共振器內部導體
- 188 共振器外部導體
- 190 共振器外部導體迴轉磁軌
- 192 耦接埠
- 194 RF傳送線耦接埠
- 195 上軸向共振器
- 196 上軸向共振器
- 197 下軸向共振器
- 198 下軸向共振器
- 200 低溫恆溫器
- 202 狹縫
- 204 延伸部
- 206 超導線圈

十、申請專利範圍：

1. 一種用於同步迴旋加速器內之磁鐵結構，包含：

一冷質結構，含有至少兩個線圈，該等線圈包含有一於公稱溫度 4.5K 下之超導材料的連續路徑，該材料的連續路徑並且徑向限定一加速室以及一延伸跨越該加速室之中央軸線的區段，其中一中間加速平面係自該中央軸線而正交地延伸跨於該加速室；以及

一磁軛，纏繞於該冷質結構，其中該磁軛亦徑向圍繞於該中央軸線之區段，其中該磁軛含有一對磁極，其具有鄰近於該中央軸線的磁極頂尖，以及距該中央軸線一放射距離而大於該等磁極頂尖的磁極翼，其中該磁軛具有一外徑之範圍在 30-114cm 之間，其從該中央軸線垂直地測量，其中該等磁極具有漸細的內部表面，以在一內級上隨著徑向距離增加而逐漸擴展該磁極間隙，並且在一外級上隨著徑向距離增加而逐漸地縮減該磁極間隙，藉以在一該等磁極頂尖與磁極翼之間的位置處產生一尖峰間隙，其超過在該等磁極頂尖間之磁極間隙的兩倍，並且超過在該等磁極翼間之磁極間隙的兩倍，其中該些超導線圈和磁極被建造以產生放射狀遞減的磁場到達至少 7 個特斯拉用於在中間加速平面中同步迴旋加速，該遞減的磁場係隨著從離子引入之內半徑至離子離開之外半徑的半徑增加而減少，並且其中該些線圈產生至少 5 個特斯拉的磁場達到該加速室。

2. 如申請專利範圍第 1 項所述之磁鐵結構，其中該等線圈為乾性，該磁鐵結構進一步含有一低溫冷卻器，其耦接

於該冷質結構以冷卻該等線圈。

3.如申請專利範圍第2項所述之磁鐵結構，其中該低溫冷卻器係一 Gifford-McMahon 低溫冷卻器或一脈衝管低溫冷卻器。

4.如申請專利範圍第2項所述之磁鐵結構，進一步包含一其中含有該等線圈的低溫恆溫器。

5.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，其中該超導材料係 NbTi 或 Nb₃Sn。

6.如申請專利範圍第4項所述之磁鐵結構，其中該超導材料係 Nb₃Sn。

7.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，其中該超導材料係一 A15 第 II 類超導體。

8.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，其中該冷質結構進一步含有一其中安裝有該等線圈的捲筒。

9.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，進一步包含徑向張力鏈結，其耦接於該冷質結構，該等徑向張力鏈結係設定以將朝外徑向力施加於該冷質結構。

10.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，其中該等線圈具有一外部半徑，其自該中央軸線而以正交方式測量為不大於 51 cm。

11.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，其中在該等磁極之間的尖峰間隙為 37-55 cm。

12.如申請專利範圍第1項所述之磁鐵結構，其中該等磁極翼具有內部表面，其係相對於該中間加速平面而以一

小於 90° 的角度，隨著距該中央軸線之半徑距離增加而斜向該中間加速平面。

13. 如申請專利範圍第 12 項所述之磁鐵結構，其中該等磁極翼之內部表面係相對於該中間加速平面而以一大於 80° 的角度，隨著距該中央軸線之半徑距離增加而斜向該中間加速平面。

14. 如申請專利範圍第 1 項所述之磁鐵結構，其中該磁軌含有一共振器結構，其於該等磁極之間含有電極，藉以在該加速室內產生一粒子加速電壓。

15. 如申請專利範圍第 1 項所述之磁鐵結構，其中一微弱聚焦磁場指數參數 n 在大致所有中間加速平面上為一自 0 至 1 的範圍內，其中 $n = -(r/B)(dB/dr)$ ，並且其中 $dB/dr < 0$ ，其中 B 為磁場，且 r 為距該中央軸線的半徑。

16. 如申請專利範圍第 1 項所述之磁鐵結構，進一步包含一耦接於該等線圈的電壓源。

17. 一種用於一同步迴旋加速器內之磁鐵結構，包含：
一冷質結構，其含有至少兩個超導線圈，其中該冷質結構限定一加速室；

一磁軌，纏繞於該冷質結構並且含有一對磁極，其於該等磁極之間並且跨於該加速室界定一磁極間隙；以及

一圍繞於該磁軌的整合磁屏蔽位於 1,000 高斯磁通量密度的等高線的外部，磁通量密度係在當將一電壓施加於該等超導線圈以在該加速室之內產生一具 8 Tesla 的磁場時，由該磁鐵結構於該磁軌外部所產生。

18.如申請專利範圍第 17 項所述之磁鐵結構，其中該整合磁屏蔽具有一彎曲形狀，其係經設定以使得自該磁軛所延展之大部份磁場線將於複數個位置處並以複數個角度與該整合磁屏蔽相交會。

19.如申請專利範圍第 17 項所述之磁鐵結構，其中該整合磁屏蔽包含鐵質。

20.如申請專利範圍第 17 項所述之磁鐵結構，進一步包含一低溫冷卻器，其係耦接於該冷質結構以冷卻該等線圈。

21.如申請專利範圍第 20 項所述之磁鐵結構，其中該低溫冷卻器含有一頭端，其係定位在該整合磁屏蔽之邊界的外部。

22.如申請專利範圍第 17 項所述之磁鐵結構，其中該冷質結構係定位在一中央軸線之周圍，並且其中該整合磁屏蔽在距該中央軸線較遠之距離處為較厚。

23.如申請專利範圍第 17 項所述之磁鐵結構，其中該整合磁屏蔽係以電氣方式隔離於該磁軛。

24.一種用以製造一含有 Nb_3Sn 超導線圈之磁鐵結構的方法，其中包含：

提供錫質線路；

提供一鈮質鑄型圍繞該等錫質線路；

在該鈮質鑄型內將該等錫質線路加熱，以令該等錫質線路與該鑄型產生反應，並且藉此構成複數個 Nb_3Sn 線束；

插入該些 Nb_3Sn 線束於一電性傳導管道中以形成一合成導體；

纏繞該合成導體；

以填充劑母體填充該纏繞的合成導體以構成一線圈；

以及

將線圈插入一磁軛內，其含有一對磁極，該等磁極之間界定一磁極間隙。

25.如申請專利範圍第24項所述之方法，其中該電性傳導管道含有銅。

26.如申請專利範圍第25項所述之方法，進一步包含以玻璃纖維將該些 Nb_3Sn 線束絕緣。

27.如申請專利範圍第26項所述之方法，其中該填充劑母體含有環氧樹脂。

28.一種用以產生一磁場以進行離子加速的方法，包含：
提供下列項目：

一冷質結構，其位在一低溫冷卻器內而圍繞於一加速室，該冷質結構包含：

至少兩個超導線圈，其係集中圍繞一中央軸線；

一低溫冷卻器，其係熱耦接於該冷質結構；

一磁軛，其係定位圍繞於該冷質結構，並且含有一對磁極，其係於其間並跨於該加速室界定出一漸細磁極間隙；以及

將該等超導線圈冷卻至或低於該超導體的關鍵溫度，並且施加一電壓於該冷質結構，藉以在該加速室內產生到達至少 8 Tesla 的一總磁場並且隨著同步迴旋加速半徑增加而減少。

29.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中該等超導線圈包含 Nb_3Sn 。

30.如申請專利範圍第 29 項所述之方法，其中在該加速室內產生出一至少 9.9 Tesla 的總磁場。

31.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中該等徑向張力鏈結係耦接於該冷質結構，該方法進一步包含施加一朝外徑向力於該冷質結構上，以維持該冷質結構的定位。

32.如申請專利範圍第 31 項所述之方法，其中在由所該冷質結構及該磁軛所產生之 1,000 高斯磁通密度的等高線外部之一距離處具有一整合磁屏蔽圍繞於該磁軛。

33.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中該磁極間隙在一內級上隨著距該中央軸線之距離增加而增加，並且其中該磁極間隙在一外級上隨著距該中央軸線之距離進一步增加而減少。

34.如申請專利範圍第 33 項所述之方法，其中該磁極間隙增加至一尖峰磁極間隙，其係在內級及外級內之最小磁極間隙距離的至少兩倍。

35.如申請專利範圍第 34 項所述之方法，其中該尖峰磁極間隙為 37-55cm。

36.如申請專利範圍第 34 項所述之方法，其中在該外級內的最小磁極間隙位在一對磁極翼之間，並且其中該等磁極翼具有內部表面，其係以相對該中央軸線為 0 到 10° 之角度隨徑向半徑增加而斜向彼此。

37.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中該等冷質

結構及磁軌在該加速室內產生至少為 9 Tesla 的總磁場。

38.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中當產生磁場時，該等線圈在該冷質結構裡係經維持於一乾性狀態下。

39.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中該等超導線圈具有一不大於 51 cm 的外部半徑。

40.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，進一步包含將一帶電粒子注入到該加速室內。

41.如申請專利範圍第 40 項所述之方法，進一步包含提供一於該等磁極之間含有多個電極之共振器結構以及施加一射頻電壓於該等電極，藉以經由該加速室加速一朝外螺旋軌道中之該帶電粒子。

42.如申請專利範圍第 28 項所述之方法，其中一中間加速平面自該中央軸線正交地延伸跨於該加速室，並且其中一微弱聚焦磁場指數參數 n 在實質跨越所有中間加速平面上係為自 0 至 1 的範圍內，其中 $n=-(r/B)(dB/dr)$ ，並且其中 $dB/dr < 0$ ，其中 B 為磁場，且 r 為距該中央軸線的半徑。

十一、圖式：

如次頁

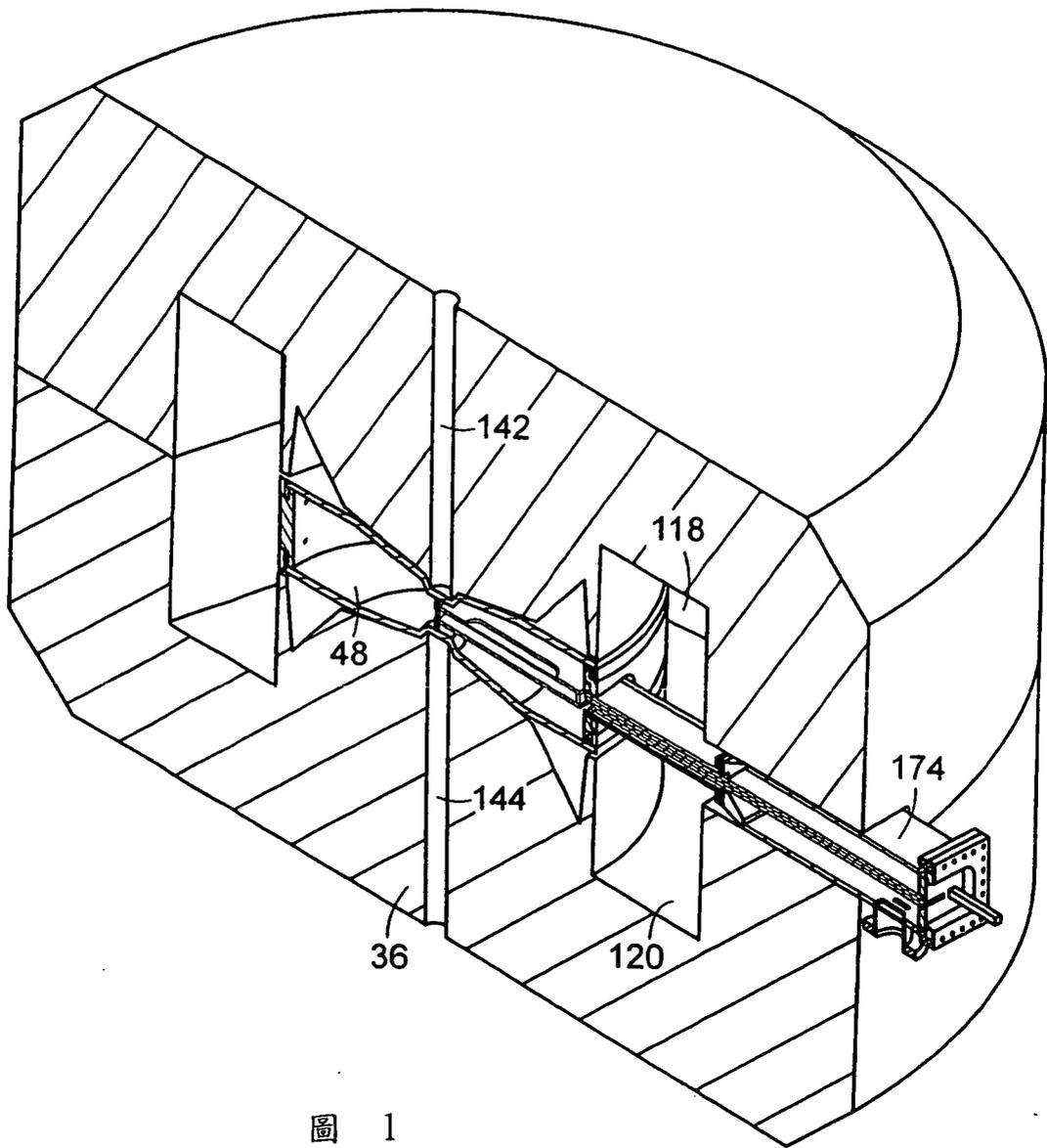


圖 1

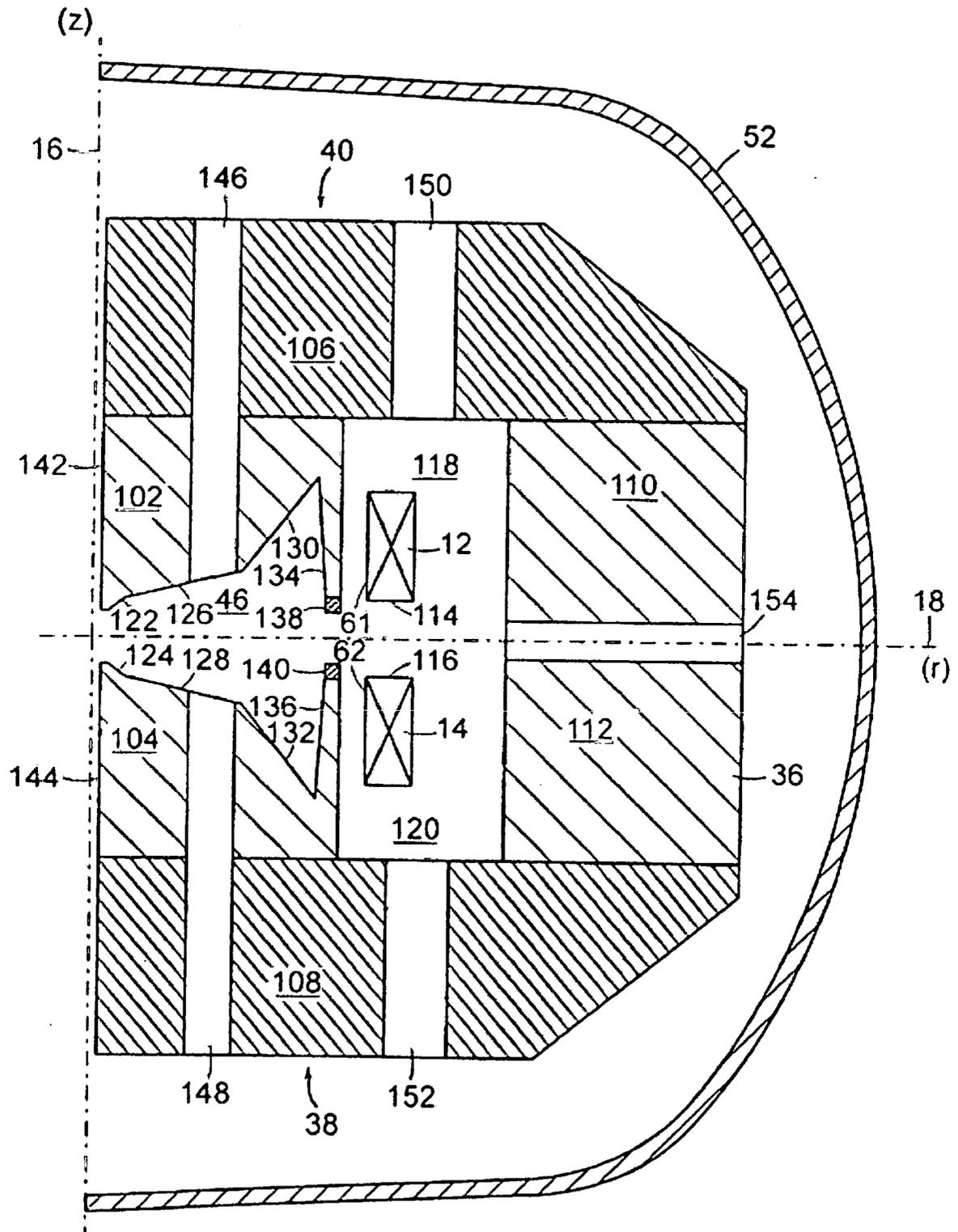


圖 2

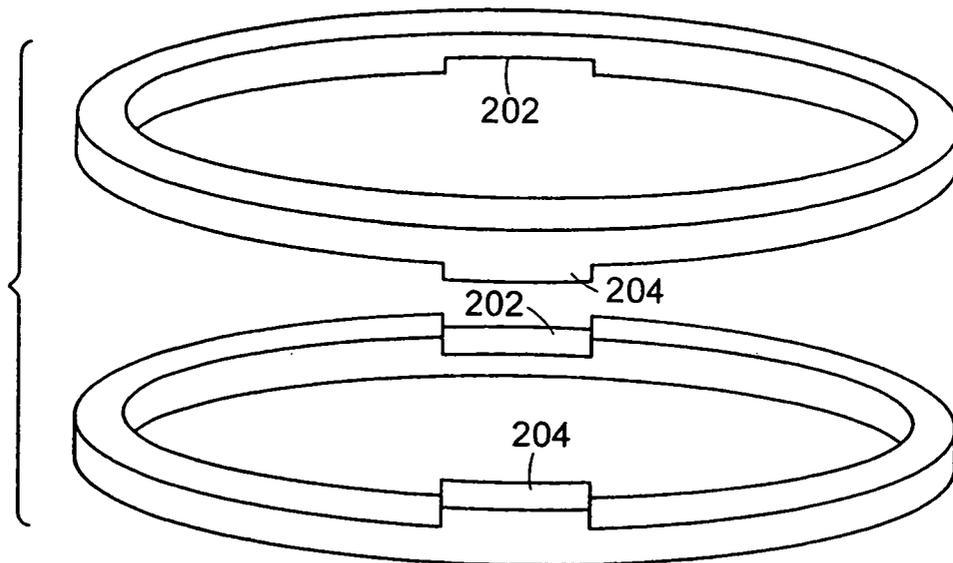


圖 3

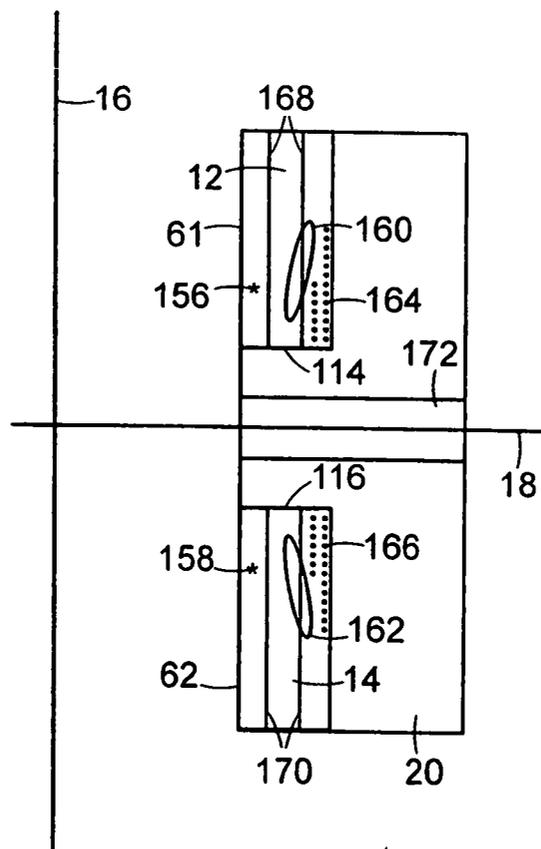


圖 4

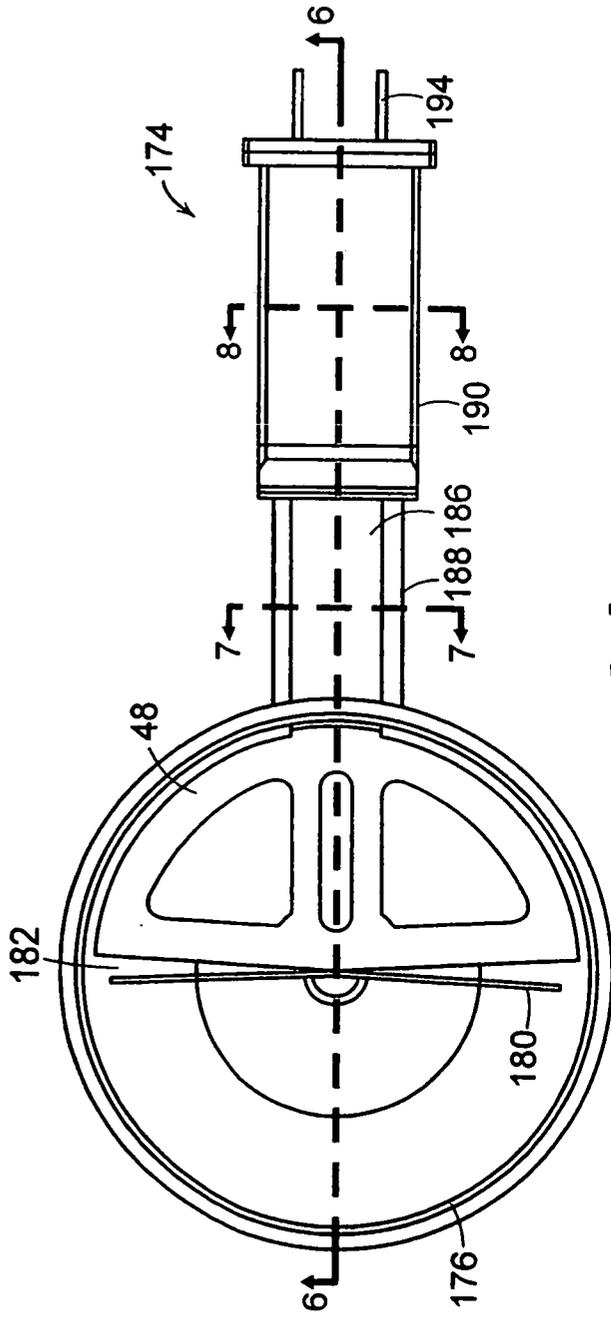


圖 5

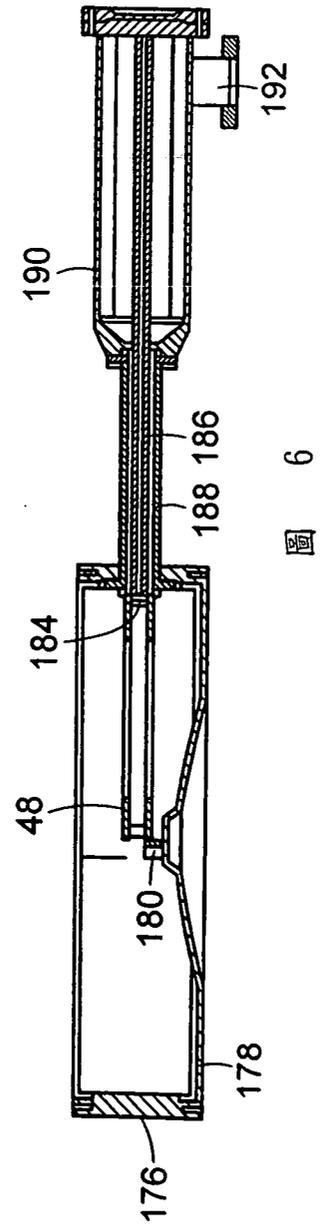


圖 6

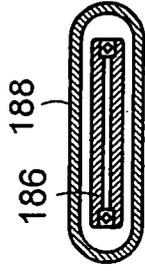


圖 7

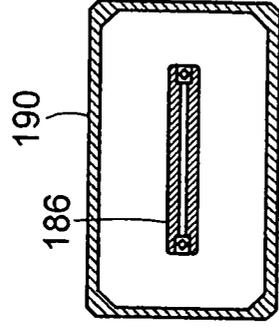


圖 8

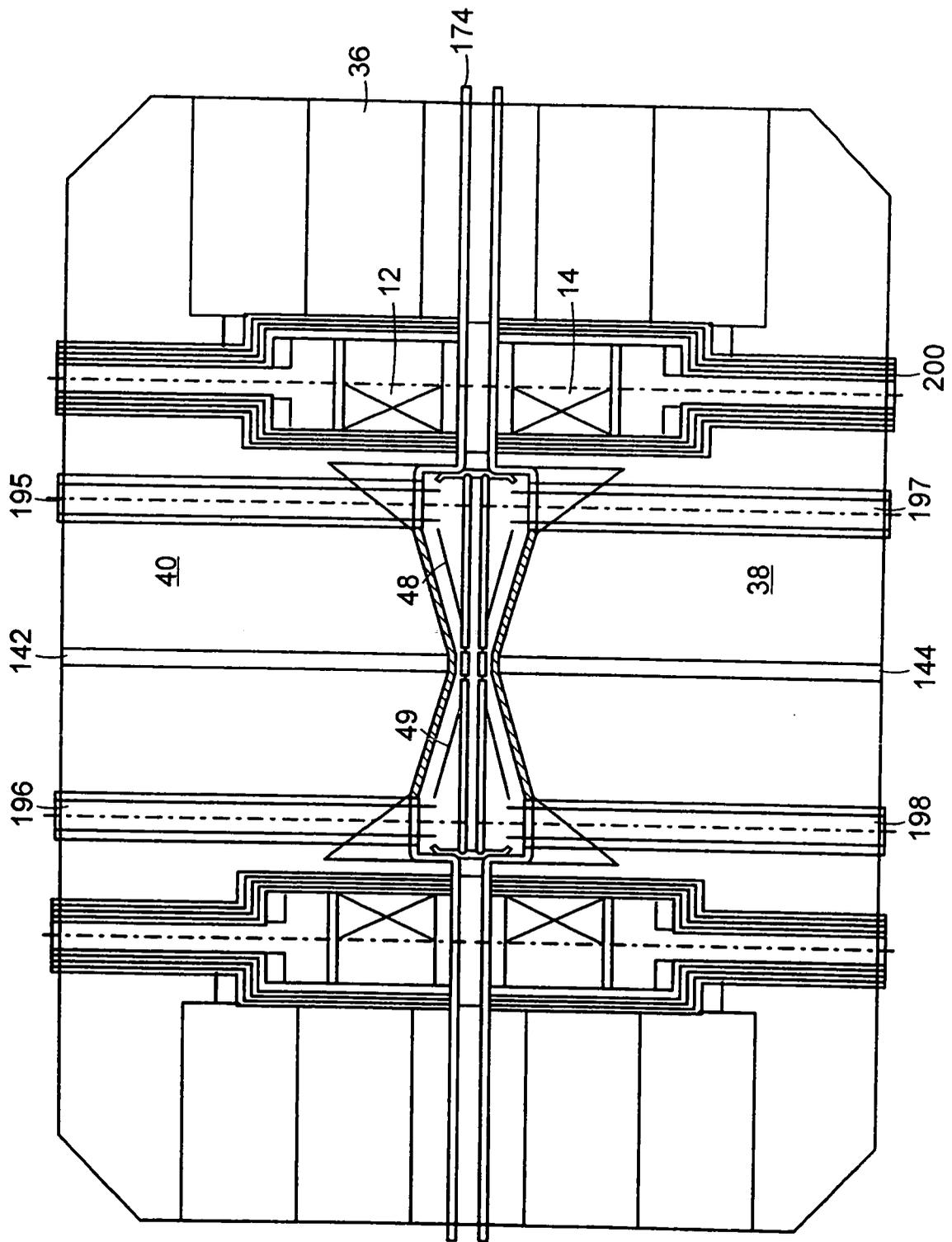


圖 9

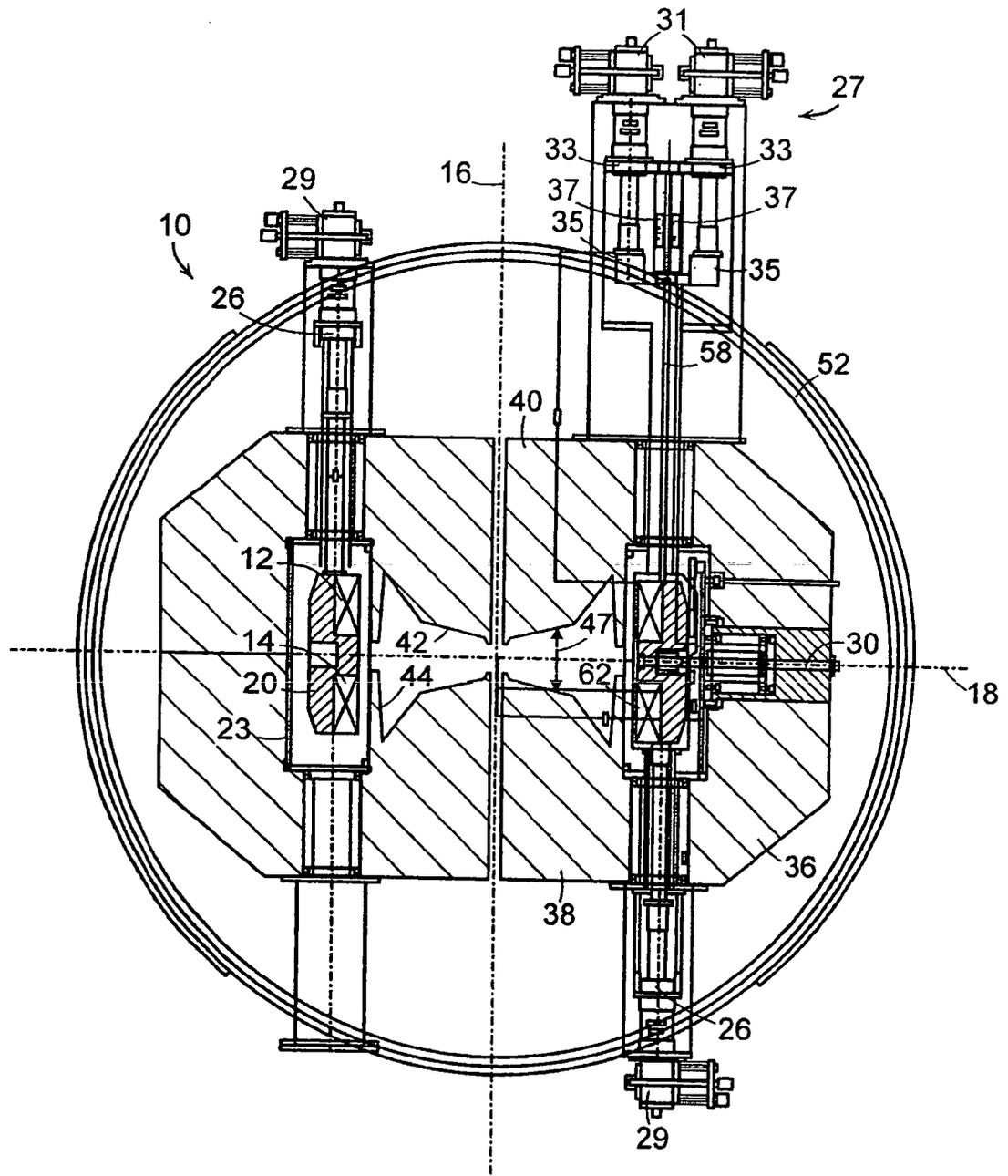


圖 10

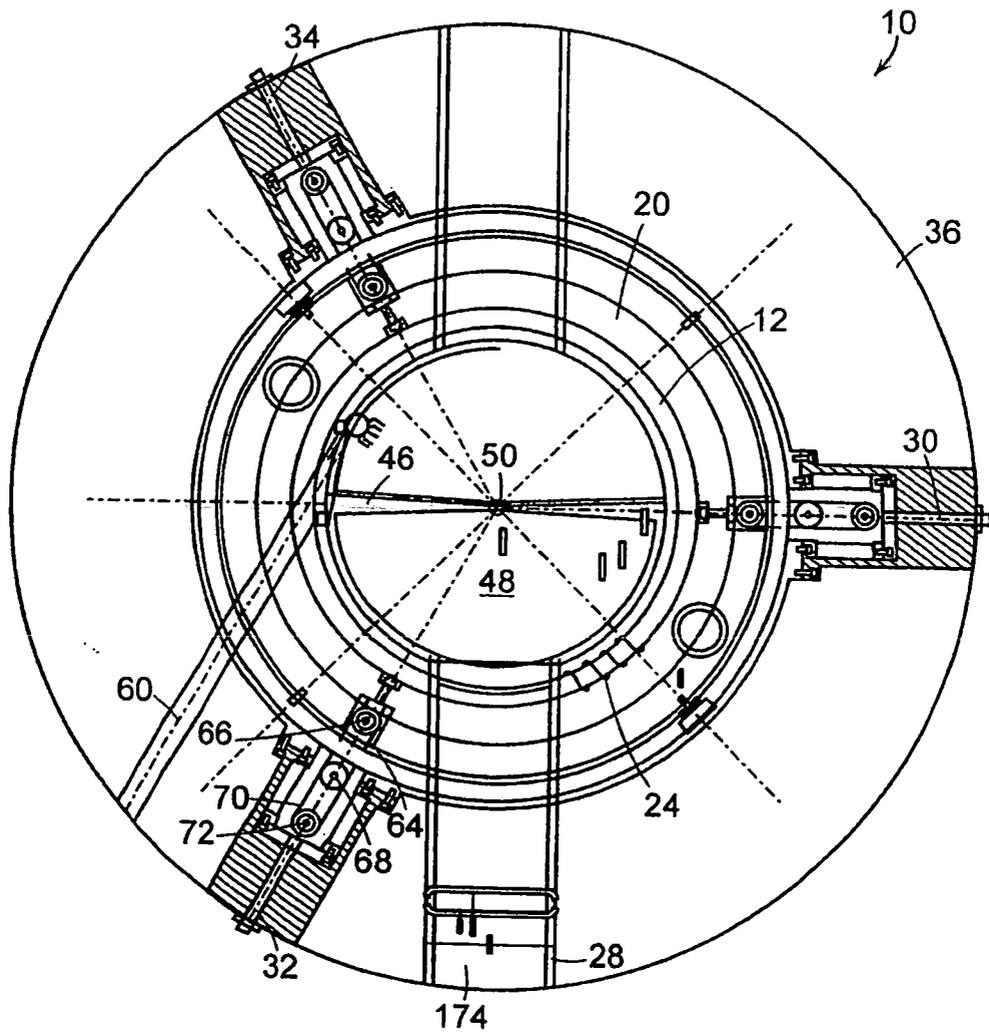


圖 11

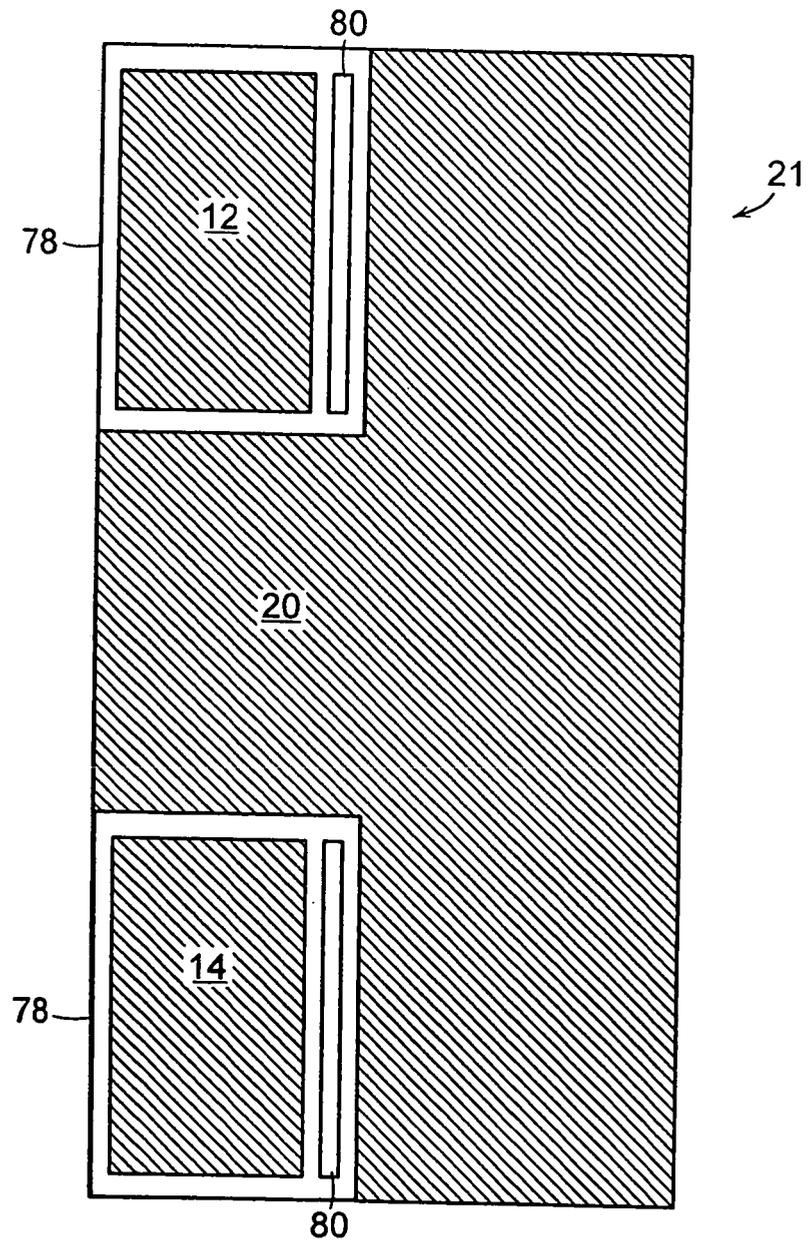


圖 12

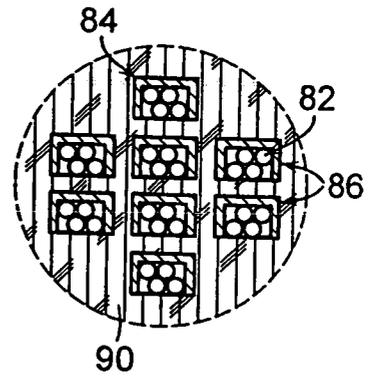
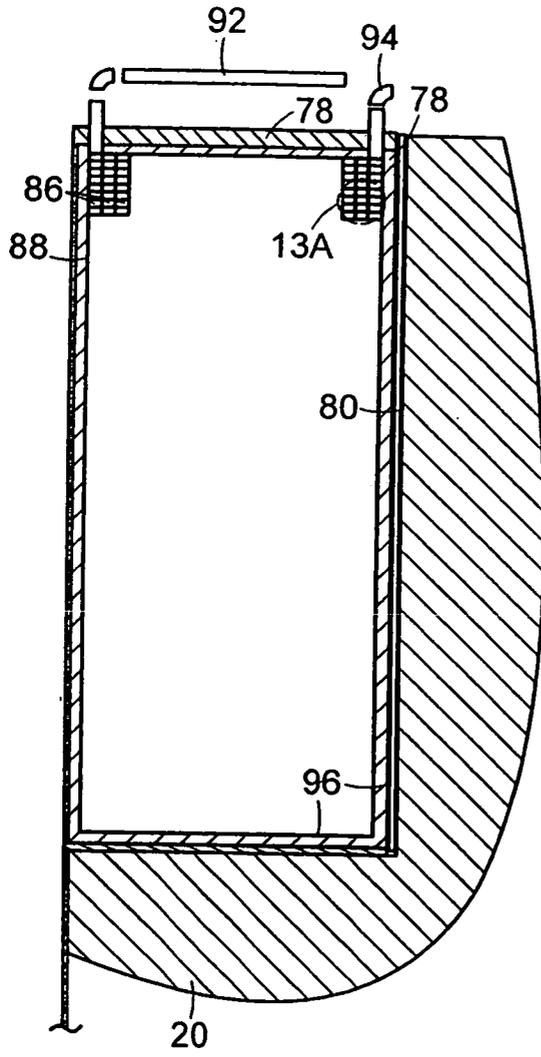


圖 13 A

圖 13

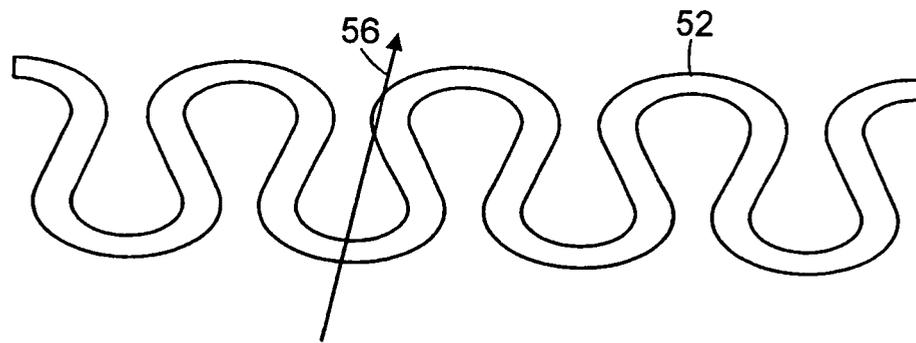


圖 14

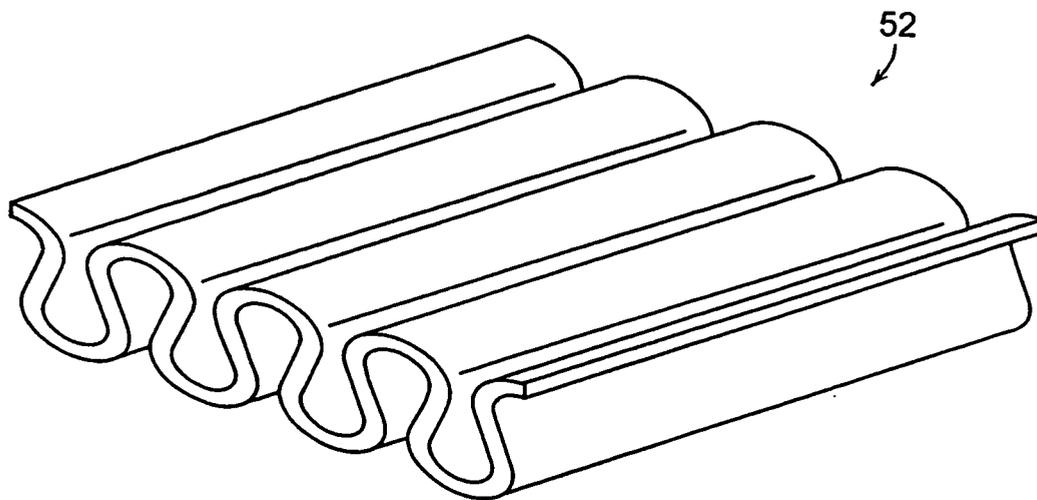


圖 15

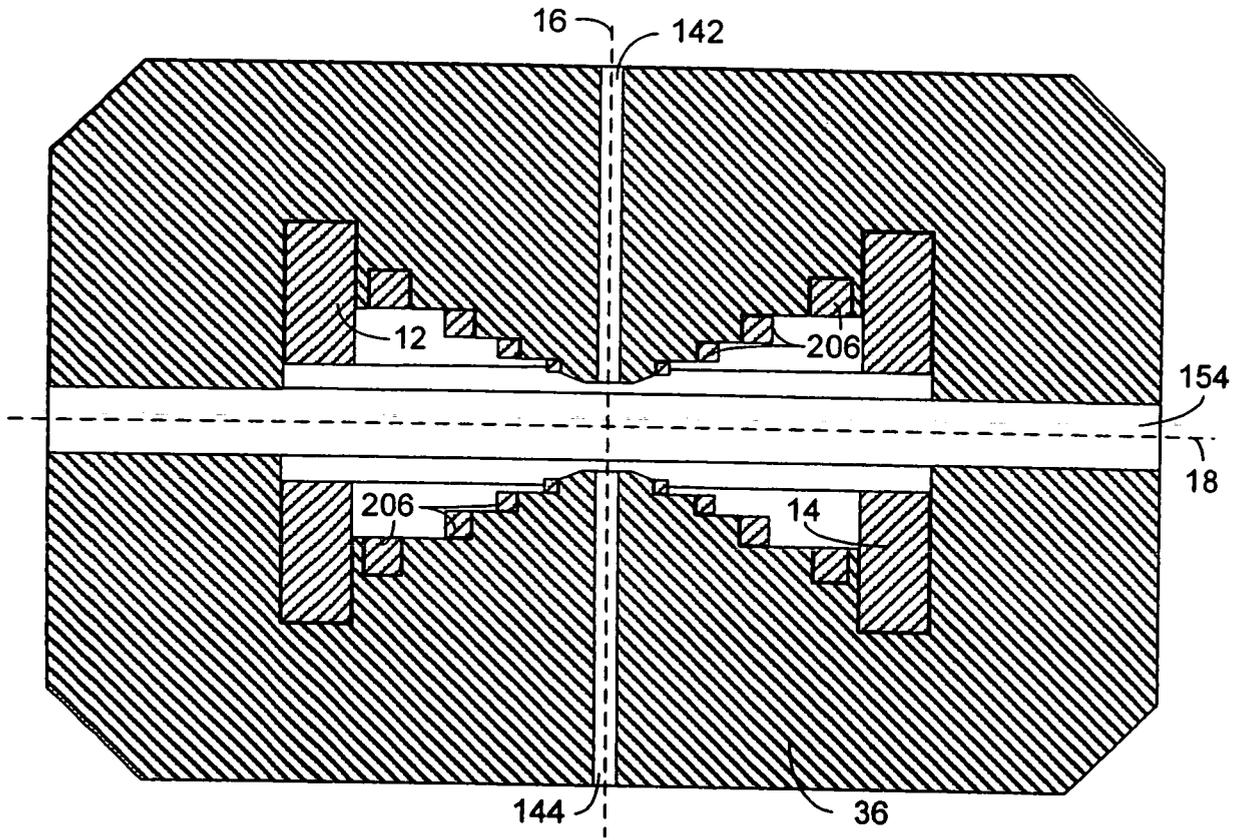


圖 16