



(19) 中華民國智慧財產局

(12) 發明說明書公開本

(11) 公開編號：TW 201828780 A

(43) 公開日：中華民國 107 (2018) 年 08 月 01 日

(21) 申請案號：107114087 (22) 申請日：中華民國 104 (2015) 年 10 月 30 日

(51) Int. Cl. : *H05H1/14 (2006.01)* *H05H1/08 (2006.01)*
H05H1/16 (2006.01) *H05H3/00 (2006.01)*

(30) 優先權：2014/10/30 美國 62/072,611

(71) 申請人：美商堤艾億科技公司 (美國) TAE TECHNOLOGIES, INC. (US)
 美國

(72) 發明人：班德包爾米契 BINDERBAUER, MICHL (AT)；葛瑞特尤西畢歐 GARATE, EUSEBIO (US)；普文斯基塞吉 PUTVINSKI, SERGEI (US)；吾田弘 GOTA, HIROSHI (JP)

(74) 代理人：陳長文

申請實體審查：有 申請專利範圍項數：1 項 圖式數：23 共 62 頁

(54) 名稱

形成及維持高效能場反轉型磁場結構的系統及方法

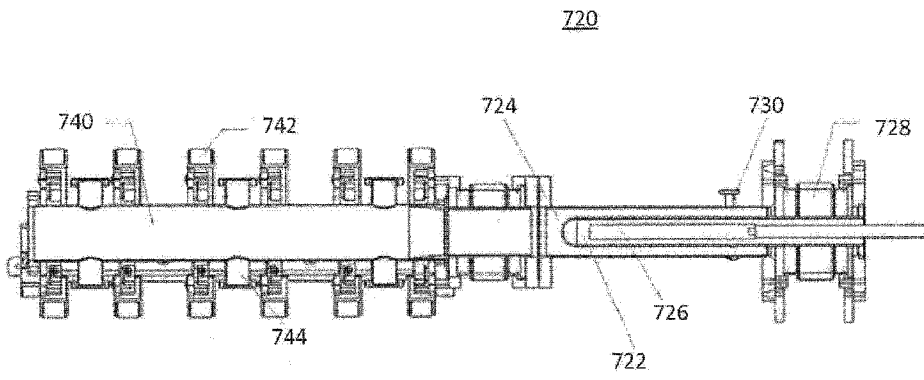
SYSTEMS AND METHODS FOR FORMING AND MAINTAINING A HIGH PERFORMANCE FRC

(57) 摘要

本發明揭示一種高效能場反轉型磁場結構(FRC)系統，其包含：一中心侷限容器；兩個直徑向相對置之反轉型場 θ 捏縮形成區段，其耦合至該容器；及兩個分流器室，其耦合至該等形成區段。一磁系統包含：準直流線圈，其沿著 FRC 系統組件軸向定位；準直流磁鏡線圈，其在該侷限室與該等形成區段之間；及磁鏡插塞，其在該等形成區段與該等分流器之間。該等形成區段包含使得 FRC 能夠靜態及動態形成及加速之模組化脈衝功率形成系統。該 FRC 系統進一步包含中性原子射束注入器、丸粒或 CT 注入器、吸氣系統、軸向電漿槍及通量表面偏壓電極。該等射束注入器較佳地朝向該室之中間平面成角度。在操作中，在中性射束注入期間，包含電漿熱能量、總粒子數、半徑及經捕獲磁通量之 FRC 電漿參數可持續處於一恆定值或附近而無衰變。

A high performance field reversed configuration (FRC) system includes a central confinement vessel, two diametrically opposed reversed-field-theta-pinch formation sections coupled to the vessel, and two divertor chambers coupled to the formation sections. A magnetic system includes quasi-dc coils axially positioned along the FRC system components, quasi-dc mirror coils between the confinement chamber and the formation sections, and mirror plugs between the formation sections and the divertors. The formation sections include modular pulsed power formation systems enabling static and dynamic formation and acceleration of the FRCs. The FRC system further includes neutral atom beam injectors, pellet or CT injectors, gettering systems, axial plasma guns and flux surface biasing electrodes. The beam injectors are preferably angled toward the midplane of the chamber. In operation, FRC plasma parameters including plasma thermal energy, total particle numbers, radius and trapped magnetic flux, are sustainable at or about a constant value without decay during neutral beam injection.

指定代表圖：



【圖 23A】

符號簡單說明：

720 . . . 緊湊環體注入器

722 . . . 圓柱形內電極/內電極

724 . . . 圓柱形外電極/外電極

726 . . . 偏壓線圈

728 . . . 電制動件

730 . . . 氣體注入埠

740 . . . 漂移管

742 . . . 漂移管線圈

744 . . . 診斷埠

【發明說明書】

【中文發明名稱】

形成及維持高效能場反轉型磁場結構的系統及方法

【英文發明名稱】

SYSTEMS AND METHODS FOR FORMING AND MAINTAINING
A HIGH PERFORMANCE FRC

【技術領域】

本文中闡述之實施例大體而言係關於磁性電漿侷限系統，且更特定而言，係關於利用優異之穩定性以及粒子、能量及通量侷限來促進形成及維持場反轉型磁場結構之系統及方法。

【先前技術】

場反轉型磁場結構(FRC)屬稱為緊湊環體(CT)之磁性電漿侷限拓撲類別。其主要展現極向磁場且擁有零或小的自生環形場(見M. Tuszewski之Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988))。此一組態之吸引在於：其易於構造及維持之簡單幾何形狀，用於促進能量提取及灰塵移除之一自然無侷限分流器，及極高 β (β 係FRC內部之平均電漿壓力對平均磁場壓力之比率) (亦即，高功率密度)。該高 β 本質有利於經濟運作及諸如D-He³及p-B¹¹之進階、無中子燃料之使用。

形成一FRC之傳統方法使用場反轉型 θ 捏縮技術，從而產生熱的高密度電漿(見A. L. Hoffman及J. T. Slough之Nucl. Fusion **33**, 27 (1993))。對此之一變化形式係平移-捕獲(translation-trapping)方法，其中在一 θ 捏縮「源」中形成之電漿係或多或少地立即射出一端至一侷限室中。然後在該室之端部處之兩個強磁鏡之間捕獲平移電漿團(例如，見H. Himura、S.

Okada、S. Sugimoto及S. Goto之Phys. Plasmas **2**，191 (1995))。一旦在侷限室中，即可應用各種加熱及電流驅動方法，諸如射束注入(中性或經中性化)、旋轉磁場、RF或歐姆加熱等。此源與侷限功能之分離提供用於未來可能之聚變反應器之關鍵工程優勢。已證實FRC係為極其穩健的，對動態形成、平移及劇烈捕獲事件具有彈性。此外，其展示採取一較佳電漿狀態之一趨勢(例如，見H. Y. Guo、A. L. Hoffman、K. E. Miller及L. C. Steinhauer之Phys. Rev. Lett. **92**，245001 (2004))。在上一個十年中已做出顯著進展來開發其他FRC形成方法：合併具有反向螺旋性之球馬克(spheromak) (例如，見Y. Ono、M. Inomoto、Y. Ueda、T. Matsuyama及T. Okazaki之Nucl. Fusion **39**，2001 (1999))，以及藉由利用旋轉磁場(RMF)來驅動電流(例如，見I. R. Jones之Phys. Plasmas **6**，1950 (1999))，其亦提供額外穩定性。

當前，已顯著地進一步開發早已提議之碰撞-合併(collision-merging)技術(例如，見D. R. Wells之Phys. Fluids **9**，1010 (1966))：在一侷限室之相對置端處之兩個單獨 θ 捏縮同時產生兩個電漿團，且高速地朝向彼此加速該等電漿團；然後其在侷限室中心處碰撞且合併以形成一合成FRC。在當前之最大FRC實驗中之一者之構造及成功操作中，展示習用碰撞-合併方法以產生穩定、長壽命、高通量、高溫度FRC (例如，見M. Binderbauer、H.Y. Guo、M. Tuszewski等人之Phys. Rev. Lett. **105**，045003 (2010))。

FRC由一分界面內側之閉合場線之一環面及恰在該分界面外側之開放場線上之一環形邊緣層組成。該邊緣層超過該FRC長度聚結成噴流，從而提供一自然分流器。該FRC拓撲與一場反轉型磁鏡電漿之拓撲一致。然

而，一顯著差異係：FRC電漿具有約為 10^{-1} 之 β 。固有的內部低磁場具備一特定原本動力粒子群，亦即與FRC小半徑相比具有大的拉摩(larmor)半徑之粒子。正是此等強動力效應顯現為至少部分地有助於過去及當前FRC (諸如在碰撞-合併實驗中產生之彼等FRC)之總穩定性。

過去之典型FRC實驗已由大部分藉由粒子輸送判定之對流損失與能量侷限來支配。粒子主要超過分界面容積徑向擴散，且然後在邊緣層中軸向損失。相應地，FRC侷限取決於閉合場線區域及開放場線區域兩者之性質。超過分界面之粒子擴散時間根據 $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ 來按比例調整($a \sim r_s/4$ ，其中 r_s 係中心分界面半徑)，且 D_{\perp} 係一特性FRC擴散度，諸如 $D_{\perp} \sim 12.5 \rho_{ie}$ ，其中 ρ_{ie} 表示在一外部施加之磁場處評估之離子回轉半徑。在過去的FRC實驗中，邊緣層粒子侷限時間 τ_{\parallel} 基本上係一軸向傳輸時間。在穩定狀態下，徑向粒子損失與軸向粒子損失之間的平衡產生一分界面密度梯度長度 $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ 。針對在分界面處具有實質密度之過去FRC，FRC粒子侷限時間根據 $(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ 來按比例調整(例如，見M. TUSZEWSKI之「Field Reversed Configurations」，Nucl. Fusion **28**，2033 (1988))。

先前FRC系統設計之另一缺點系需要使用外部多極以控制旋轉不穩定性，諸如快速生長之 $n=2$ 互換不穩定性。以此方式，典型的外部施加之四極場提供所需之磁性回復壓力以抑制此等不穩定模式之生長。儘管此技術足以用於熱電漿塊之穩定控制，但其針對更具動力的FRC或進階混合FRC (其中一高度動力之大軌道粒子群與通常的熱電漿組合在一起)造成一嚴重問題。在此等系統中，軸對稱磁場由於此等多極場所致的變形導致經由無碰撞隨機擴散之劇烈快速粒子損失(正則角動量之保存損失之一結果)。因此，提供穩定性控制而不增強任何粒子之擴散之一新穎解決方案

係重要的，以便利用此等之前從未開發之進階FRC概念之較高效能潛力。

因此，鑒於上文，期望改良FRC之侷限性及穩定性以便使用穩定狀態之FRC作為包含緊湊中子源(針對醫用同位素生產、核廢料補救、材料研究、中子射線照相術及斷層攝影術)、緊湊光子源(針對化學品生產及處理)、質量分離與濃縮系統以及用於未來能量產生之輕核聚變之反應器核之大量應用之一路徑。

【發明內容】

本文中提供之本發明實施例係關於促進新的高效能場反轉型磁場結構(FRC)之形成及維持之系統及方法。根據此新的高效能FRC範例，本發明系統組合眾多新穎觀念及手段以明顯地改良粒子、能量及通量之FRC侷限性以及提供穩定性控制而無消極的副作用。

本文提供之一種FRC系統包含：一中心侷限容器，其由兩個直徑向相對置之反轉型場 θ 捏縮形成區段圍繞，以及除該等形成區段外，用以控制中性密度及雜質污染之兩個分流器室。一種磁系統包含：一系列準直流線圈，其位於沿著該FRC系統之組件之軸向位置處；準直流磁鏡線圈，其在該侷限室之任一端與毗鄰形成區段之間；及磁鏡插塞，其包括在該等形成區段及分流器中之每一者之間的緊湊準直流磁鏡線圈，其產生額外導引場以朝向分流器集中磁通量表面。該等形成區段包含：模組化脈衝功率形成系統，其使得FRC能夠現場形成且然後經加速及注入(=靜態形成)或同時地經形成及加速(=動態形成)。

該FRC系統包含中性原子射束注入器及一丸粒注入器。在一項實施例中，射束注入器係成角度的以朝向中間平面注入中性粒子。使射束注入器朝向中間平面成角度且使軸向射束位置接近於中間平面會改良射束-電

漿耦合，即使在FRC電漿在注入時段期間縮小或以其他方式軸向地收縮之情況下。亦包含吸氣系統以及軸向電漿槍。亦提供偏壓電極用於開放通量表面之電偏壓。

在操作中，在將中性射束注入至電漿且丸粒提供適當粒子再填裝燃料時，包含電漿熱能量、總粒子數、電漿半徑及長度以及磁通量之FRC全域電漿參數係實質上可持續的而無衰變。

在一替代實施例中，提供一緊湊環體(CT)注入器來替代丸粒注入器以藉由注入一球馬克狀電漿而提供適當粒子再填裝燃料。

在檢驗下列圖及詳細說明之後，本發明之系統、方法、特徵及優勢將係或將變得為熟習此項技術者所易於瞭解。所有此等額外方法、特徵及優勢皆意欲包含於此說明內、在本發明之範疇內且由隨附申請專利範圍保護。本發明亦不意欲限於需要實例性實施例之細節。

【圖式簡單說明】

包含為本發明說明書之部分之隨附圖式圖解說明當前較佳之實施例，且與上文給出之一般說明及下文給出之較佳實施例之詳細說明一起用於闡釋及教示本發明之原理。

圖1圖解說明與處於一習用FRC體系(CR)下相對且與其他習用FRC實驗相對而處於一高效能FRC體系(HPF)下之本發明FRC系統中之粒子侷限。

圖2圖解說明本發明FRC系統之組件及本發明FRC系統中可產生之一FRC之磁性拓撲。

圖3A圖解說明本發明FRC系統在自頂部觀看時之基本佈局，包含中性射束、電極、電漿槍、磁鏡插塞及丸粒注入器之較佳配置。

圖3B圖解說明在自頂部觀看時之中心侷限容器，且展示中性射束以法向於中心侷限容器中之主對稱軸之一角度經配置。

圖3C圖解說明在自頂部觀看時之中心侷限容器，且展示中性射束以小於法向於中心侷限容器中之主對稱軸之一角度經配置且經定向以朝向中心侷限容器之中間平面注入粒子。

圖4圖解說明用於形成區段之一脈衝功率系統之組件之一示意圖。

圖5圖解說明一個別脈衝功率形成滑架之一等角視圖。

圖6圖解說明一形成管總成之一等角視圖。

圖7圖解說明中性射束系統及關鍵組件之一部分剖面等角視圖。

圖8圖解說明在侷限室上之中性射束配置之一等角視圖。

圖9圖解說明Ti及Li吸氣系統之一較佳配置之一部分剖面等角視圖。

圖10圖解說明安裝於分流器室中之一電漿槍之一部分剖面等角視圖。亦展示相關聯磁鏡插塞及一分流器電極總成。

圖11圖解說明在侷限室之軸向端處之一環形偏壓電極之一較佳佈局。

圖12圖解說明自嵌入中心金屬侷限室內側之兩個場反轉型 θ 捏縮形成區段及磁探針處之一系列外部反磁性迴圈獲得之FRC系統中之排斥通量半徑之演變。時間係自形成源中之同步化場反轉之瞬間量測，且距離 z 係相對於機器之軸向中間平面給出。

圖13(a)至圖13(d)圖解說明來自當前FRC系統上之一代表性非HPF、非持續排放之資料。展示隨時間而變之以下各項：**(a)**在中間平面處之排斥通量半徑，**(b)**來自中間平面CO₂干擾計之線積分密度之6個弦，**(c)**依據該CO₂干擾計資料之經阿貝爾變換之密度徑向分佈型，及**(d)**依據壓力平

衡之總電漿溫度。

圖14圖解說明針對圖13中所展示之當前FRC系統之同一排放在選定時間處之排斥通量軸向分佈型。

圖15圖解說明安裝於侷限室外側之鞍型線圈之一等角視圖。

圖16圖解說明FRC壽命與所注入中性射束之脈衝長度之相關性。如所展示，較長射束脈衝產生較長壽命之FRC。

圖17圖解說明FRC系統之不同組件對FRC效能及HPF體系之保持之個別及組合效應。

圖18(a)至圖18(d)圖解說明來自當前FRC系統上之一代表性HPF、非持續排放之資料。展示隨時間而變之以下各項：**(a)**在中間平面處之排斥通量半徑，**(b)**來自中間平面CO₂干擾計之線積分密度之6個弦，**(c)**依據該CO₂干擾計資料之經阿貝爾變換之密度徑向分佈型，及**(d)**依據壓力平衡之總電漿溫度。

圖19圖解說明隨電子溫度(T_e)而變之通量侷限。其表示用於HPF排放之一新建立之優異標度體系之一圖形表示。

圖20圖解說明對應於不成角度及成角度之經注入中性射束之脈衝長度之FRC壽命。

圖21A及圖21B圖解說明一緊湊環體(CT)注入器之基本佈局。

圖22A及圖22B圖解說明展示安裝至其之CT注入器之中心侷限容器。

圖23A及圖23B圖解說明具有耦合至其之一漂移管之CT注入器之一替代性實施例之基本佈局。

應注意，該等圖未必按比例繪製，且貫穿該等圖出於例示性目的，

具有類似結構或功能之元件大體由相同元件符號表示。亦應注意，該等圖僅意欲促進本文所闡述之各種實施例之說明。該等圖未必闡述本文中所揭示教示之每一態樣且不限制申請專利範圍之範疇。

【實施方式】

本文中提供之本發明實施例係關於促進形成及維持具有優於習用FRC之優異穩定性以及優異的粒子、能量及通量侷限之高效能場反轉型磁場結構(FRC)。此高效能FRC提供包含緊湊中子源(針對醫用同位素生產、核廢料補救、材料研究、中子射線照相術及斷層攝影術)、緊湊光子源(針對化學品生產及處理)、質量分離與濃縮系統以及用於未來能量產生之輕核聚變之反應器核之大量應用之一路徑。

已開發各種輔助系統及操作模式來評定FRC中是否存在一優異的侷限體系。此等努力已導致突破性發現及本文中所闡述之一高效能FRC範例之開發。根據此新範例，本發明系統及方法組合眾多新穎觀念及手段以明顯地改良如圖1中圖解說明之FRC侷限以及提供穩定性控制而無消極的副作用。如下文更詳細論述，圖1繪示下文所闡述之一FRC系統10中之粒子侷限(見圖2及圖3)，與根據用於形成及維持一FRC之一習用體系CR操作相對，且與根據用於形成及維持在其他實驗中使用之一FRC之習用體系之粒子侷限相對，其係根據用於形成及維持一FRC之一高效能FRC體系(HPF)來操作。本揭示內容將概述及詳述FRC系統10之發明性個別組件及方法以及其共同效應。

FRC系統之說明

真空系統

圖2及圖3繪示本發明FRC系統10之一示意圖。FRC系統10包含：一

中心侷限容器100，其由兩個直徑向相對置之反轉型場 θ 捏縮形成區段200圍繞，以及除形成區段200外，用以控制中性密度及雜質污染之兩個分流器室300。本發明FRC系統10經建造以容納超高真空，且以通常為 10^{-8} 托之基礎壓力操作。此真空壓力需要：使用在配合組件之間的兩倍泵吸配合凸緣、金屬O型環、高純度內壁，以及所有部件在裝配之前的仔細初始表面調節，諸如物理及化學清潔，後續接著24小時250°C真空烘烤及氬輝光放電清潔。

反轉型場 θ 捏縮形成區段200係標準場反轉型 θ 捏縮(FRTP)，但具有在下文詳細論述之一進階脈衝功率形成系統(見圖4至圖6)。每一形成區段200由標準不透明工業級石英管製成，具有超純石英之一2毫米內部襯裡。侷限室100由不銹鋼製成以允許有大量徑向及切向埠；其亦在下文闡述之實驗之時段上用作一通量保存器且限制快速磁瞬態。利用一組乾式渦捲低真空泵、渦輪分子泵及低溫泵在FRC系統10內形成及維持真空。

磁系統

在圖2及圖3中圖解說明磁系統400。除其他特徵外，圖2圖解說明屬FRC系統10可產生之一FRC 450之一FRC磁通量及密度等值線(隨徑向及軸向座標而變)。此等等值線係使用經開發以模擬對應於FRC系統10之系統及方法之代碼藉由一2D電阻式Hall-MHD數字模擬而獲得，且與所量測之實驗資料良好地一致。如圖2中所見，FRC 450由一分界面451內部之FRC 450之內部453處之閉合場線之一環面及恰在分界面451外側之開放場線452上之一環形邊緣層456組成。邊緣層456超過FRC長度聚結成噴流454，從而提供一自然分流器。

主磁系統410包含一系列準直流線圈412、414及416，其位於沿著

FRC系統10之組件(亦即，沿著侷限室100、形成區段200及分流器300)之特定軸向位置處。準直流線圈412、414及416由準直流切換電源饋電且在侷限室100、形成區段200及分流器300中產生約0.1 T之基本磁偏置場。除準直流線圈412、414及416以外，主磁系統410亦包含在侷限室100之任一端與毗鄰形成區段200之間的準直流磁鏡線圈420 (由切換電源饋電)。準直流磁鏡線圈420提供高達5的磁鏡比率，且可經獨立地激發以達成均衡塑形控制。另外，磁鏡插塞440定位於形成區段200與分流器300中之每一者之間。磁鏡插塞440包括緊湊準直流磁鏡線圈430及磁鏡插塞線圈444。準直流磁鏡線圈430包含三個線圈432、434及436 (由切換電源饋電)，該等線圈產生額外導引場以朝向通過磁鏡插塞線圈444之小直徑通道442集中磁通量表面455。環繞小直徑通道442且由LC脈衝功率電路饋電之磁鏡插塞線圈444產生高達4 T之強磁鏡場。此整個線圈配置之目的係將磁通量表面455及端流電漿噴流454緊實地捆束及導引至分流器300之遠端室310中。最後，一組鞍型線圈「天線」460 (見圖15)位於侷限室100外側，在中間平面之每一側上兩個，且由直流電源饋電。鞍型線圈天線460可經組態以提供約0.01 T之一準靜態磁偶極或磁四極場，以用於控制旋轉不穩定性及/或電子電流控制。取決於所施加電流之方向，鞍型線圈天線460可靈活地提供關於機器之中間平面對稱或反對稱之磁場。

脈衝功率形成系統

脈衝功率形成系統210根據一經修改之 θ 捏縮原理來操作。存在各自為形成區段200中之一者提供動力之兩個系統。圖4至圖6圖解說明形成系統210之主要建立區塊及配置。形成系統210由一模組化脈衝功率配置構成，該模組化脈衝功率配置由各自激發環繞形成石英管240的一條帶總成

230 (=若干條帶)之一子組線圈232之個別單元(=滑架) 220組成。每一滑架220由電容器221、電感器223、快速高電流切換器225及相關聯觸發器222以及轉儲電路224組成。總體而言，每一形成系統210儲存350 kJ至400 kJ之電容能量，此提供高達35 GW之電力以形成及加速FRC。此等組件之協調操作係經由一目前最佳之觸發及控制系統222及224達成，其允許每一形成區段200上之形成系統210之間之同步化時序且將切換抖動最小化至數十奈秒。此模組化設計之優勢係其靈活操作：FRC可原位形成且然後經加速及注入(=靜態形成)或經同時形成及加速(=動態形成)。

中性射束注入器

中性原子射束600部署於FRC系統10上以提供加熱及電流驅動以及增進快速粒子壓力。如在圖3A、圖3B及圖8中所展示，包括中性原子射束注入器系統610及640之個別射束線位於中心侷限室100周圍，且利用一衝擊參數切向於該FRC電漿(且垂直於中心侷限容器100中之主對稱軸或以法向於該主對稱軸之一角度)注入快速粒子，使得目標捕獲區完全位於分界面451內(見圖2)。每一注入器系統610及640能夠將高達1 MW之中性射束功率注入至FRC電漿中，其中粒子能量介於20 keV與40 keV之間。系統610及640係基於正離子多孔隙提取源，且利用幾何集中、離子提取柵極之慣性冷卻及差動泵吸。除使用不同電漿源以外，系統610及640亦主要藉由其實體設計來區分，以滿足其各別安裝位置，產生側面注入及頂部注入能力。在圖7中針對側面注入器系統610具體地圖解說明此等中性射束注入器之典型組件。如圖7中所展示，每一個別中性射束系統610在一輸入端處包含一RF電漿源612(在系統640中此係用一弧源替換)，其中一磁屏614覆蓋該端部。一離子光學源及加速柵極616耦合至電漿源612，且一閘

閥620定位於離子光學源及加速柵極616與一中和器622之間。一偏轉磁體624及一離子轉儲部628位於中和器622與在出口端處之一瞄準裝置630之間。一冷卻系統包括兩個低溫冷凍機634、兩個低溫板636及一LN2側板638。此靈活設計允許關於一廣泛範圍之FRC參數進行操作。

中性原子射束注入器600之一替代性組態係切向於FRC電漿但以小於中心侷限容器100中之主對稱軸之 90° 之一角度A注入快速粒子。在圖3C中展示射束注入器615之此等類型之定向。另外，射束注入器615可經定向使得在中心侷限容器100之中間平面之任一側上之射束注入器615朝向中間平面注入其粒子。最後，此等射束系統600之軸向位置可經選擇以較接近於中間平面。此等替代性注入實施例促成一較中心填裝燃料選項，此提供射束之較好耦合及經注入快速粒子之較高捕獲效率。此外，取決於角度及軸向位置，射束注入器615之此配置允許對FRC 450之軸向伸長及其他特性之較直接且獨立控制。例如，以相對於容器之主對稱軸之一淺角度A注入射束將形成具有較長軸向延伸及較低溫度之一FRC電漿，而選擇一較垂直角度A將導致一軸向較短但較熱電漿。以此方式，射束注入器615之注入角度A及位置可出於不同目的而係最佳化的。另外，射束注入器615之此成角度及定位可允許較高能量之射束(此較有利於以較小發散度沈積較多功率)注入至比原本捕獲此等射束所需之磁場低之磁場中。此歸因於以下事實：能量之方位角分量判定快速離子軌道尺度(其隨著相對於容器之主對稱軸之注入角度在恆定射束能量下減小而變得越來越小)。此外，朝向中間平面之成角度注入以及軸向射束位置接近於中間平面會改良射束-電漿耦合，即使在FRC電漿在注入時段期間縮小或以其他方式軸向地收縮之情況下。

丸粒注入器

為提供一種構件以注入新粒子且較好地控制FRC粒子存量，在FRC系統10上利用一12桶丸粒注入器700（例如，見I. Vinyar等人之「Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A」，Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium，9月27日至10月1日(2010年)）。圖3圖解說明丸粒注入器700在FRC系統10上之佈局。以介於150 km/s至250 km/s之範圍內之一速度將圓柱形丸粒(D ~ 1 mm，L ~ 1 mm至2 mm)注入至FRC中。每一個別丸粒含有約 5×10^{19} 個氫原子，其可比於FRC粒子存量。

吸氣系統

習知中性暈氣體在所有侷限系統中皆係一嚴重問題。電荷交換及再循環(冷雜質材料自壁之釋放)程序可對能量及粒子侷限具有一毀滅性效應。另外，在邊緣處或附近之中性氣體之任何顯著密度將導致所注入之大軌道(高能量)粒子(大軌道係指具有按FRC拓撲之尺度之軌道或至少比典型的磁場梯度長度尺度大得多之軌道半徑之粒子)之壽命之迅速損失或至少嚴重地縮減其壽命，此係對所有能量電漿應用(包含經由輔助射束加熱之聚變)皆不利之一事實。

表面調節係一種可藉以在一侷限系統中控制或減少中性氣體及雜質之不利影響之手段。為此，本文中提供之FRC系統10採用鈦及鋰沈積系統810及820，其用Ti及/或Li之膜(數十微米厚)塗佈侷限室(或容器) 100及分流器300之面向電漿表面。該等塗層係經由汽相沈積技術達成。固態Li及/或Ti經蒸發及/或昇華且噴射至鄰近表面上以形成塗層。源系具有導引噴嘴之原子爐(在Li之情形中) 822，或係具有導引圍板之經加熱實心球體(在

Ti之情形中) 812。Li蒸發器系統通常以一連續模式操作，而Ti昇華器主要在電漿操作之間而間歇地操作。此等系統之操作溫度高於600°C以獲得快速沈積速率。為達成良好的壁覆蓋率，多個經戰略定位之蒸發器/昇華器系統係必需的。圖9詳述FRC系統10中之吸氣沈積系統810及820之一較佳配置。該等塗層充當吸氣表面且高效地泵吸原子及分子類氫物種(H及D)。該等塗層亦將其他典型雜質(諸如碳及氧)減少至不明顯位準。

磁鏡插塞

如上文所提及，FRC系統10採用如圖2及圖3中所展示之若干組磁鏡線圈420、430及444。一第一組磁鏡線圈420位於侷限室100之兩個軸向端處，且自主磁系統410之侷限線圈412、414及416獨立地激發。第一組磁鏡線圈420主要幫助在合併期間操縱及軸向含納FRC 450，且在持續期間提供均衡塑形控制。第一組磁鏡線圈420主要產生高於中心侷限線圈412所產生之中心侷限場之磁場(約為0.4 T至0.5 T)。第二組磁鏡線圈430(其包含三個緊湊準直流磁鏡線圈432、434及436)位於形成區段200與分流器300之間且由一普通切換電源驅動。磁鏡線圈432、434及436與較緊湊脈衝磁鏡插塞線圈444(由一電容電源饋電)及實體束縮部442一起形成磁鏡插塞440，該磁鏡插塞提供具有極高磁場之一窄的低氣體電導路徑(在2 T至4 T之間，上升時間為約10 ms至20 ms)。與侷限線圈412、414及416之米以上尺度之內徑及扁圓餅設計相比，最緊湊脈衝磁鏡線圈444具有緊湊徑向尺寸、20 cm之內徑及類似長度。磁鏡插塞440之目的係多項：(1)線圈432、434、436及444將磁通量表面452及端流電漿噴流454緊實地捆束及導引至遠端分流器室300中。此確保排出粒子適當地到達分流器300且存在自中心FRC 450之開放場線452區域一直追蹤至分流器300之連續通量

表面455。(2) FRC系統10中之實體束縮部442 (線圈432、434、436及444藉以達成磁通量表面452及電漿噴流454之通過)提供對來自位於分流器300中之電漿槍350之中性氣體流之一阻止。以同樣方式，束縮部442防止氣體自形成區段200至分流器300之回流，藉此減少在開始一FRC之起動時不得不引入至整個FRC系統10之中性粒子之數目。(3)由線圈432、434、436及444產生之強的軸向磁鏡減少軸向粒子損失，且藉此減少開放場線上之平行粒子擴散性。

軸向電漿槍

來自安裝於分流器300之分流器室310中之電漿槍350之電漿流意欲改良穩定性及中性射束效能。電漿槍350安裝於分流器300之室310內部之軸上，如圖3及圖10所圖解說明，且產生沿著分流器300中之開放通量線452且朝向侷限室100之中心流動之電漿。電漿槍350以一高密度氣體排放在一墊圈堆疊通道中操作，且經設計以產生數千安培之完全電離電漿達5 ms至10 ms。電漿槍350包含一脈衝磁線圈，其匹配具有侷限室100中之電漿之所期望大小之輸出電漿流。電漿槍350之技術參數以具有一5 cm至13 cm外徑及最多約10 cm內徑之一通道為特徵，且在400 V至600 V處提供一排放電流為10 kA至15 kA，其中一槍內磁場在0.5 T至2.3 T之間。

槍電漿流可穿透磁鏡插塞440之磁場且流動至形成區段200及侷限室100中。透過磁鏡插塞440之電漿轉移之效率隨電漿槍350與插塞440之間的距離減小而增加，且藉由使插塞440較寬及較短而增加。在合理條件下，電漿槍350可透過2 T至4 T磁鏡插塞440各自遞送大致 10^{22} 個質子/秒，分別具有約150 eV至300 eV及約40 eV至50 eV之高離子及電子溫度。電漿槍350提供FRC邊緣層456之顯著再填裝燃料，及一經改良總

FRC粒子侷限。

為進一步增加電漿密度，可利用一氣體盒以將額外氣體噴出至來自電漿槍350之電漿流中。此技術允許所注入電漿密度之一數倍增加。在FRC系統10中，安裝於磁鏡插塞440之分流器300側上之一氣體盒改良FRC邊緣層456之再填裝燃料、FRC 450之形成及電漿線系結。

在給出以上論述之所有調整參數且亦慮及藉助僅一個或兩個電漿槍之操作係可能的之情況下，易於瞭解，大範圍之操作模式係可達到的。

偏壓電極

開放通量表面之電偏壓可提供引起方位 $E \times B$ 運動之徑向電位，此提供類似於轉動一把手之一控制機制，以控制開放場線電漿以及經由速度剪力之實際FRC核450之旋轉。為實現此控制，FRC系統10採用戰略放置於機器之各部分中之各種電極。圖3繪示定位於FRC系統10內之較佳位置處之偏壓電極。

原則上，存在四類電極：(1)點電極905，其在侷限室100中，與FRC 450之邊緣中之特定開放場線452接觸以提供局部充電，(2)環形電極900，其在侷限室100與形成區段200之間以便以一方位對稱方式對遠邊緣通量層456充電，(3)同心電極堆疊910，其在分流器300中以對多個同心通量層455充電(藉以可藉由調整分流器磁場以便終止適當電極910上之所期望通量層456來控制層之選擇)，及最後(4)電漿槍350之陽極920 (見圖10)本身(其攔截FRC 450之分界面附近之內部開放通量表面455)。圖10及圖11展示針對此等電極中之某些電極之某些典型設計。

在所有情形中，此等電極皆由脈衝或直流電源以高達約800 V之電壓驅動。取決於電極大小及與哪些通量表面交叉，可引導在千安培範圍內之

電流。

FRC系統之非持續操作——習用體系

FRC系統10上之標準電漿形成遵循完備之反轉型場 θ 捏縮技術。用於起動一FRC之一典型處理程序藉由將準直流線圈412、414、416、420、432、434及436驅動至穩態操作而開始。然後，脈衝功率形成系統210之RFTP脈衝功率電路驅動脈衝快速反轉型磁場線圈232以在形成區段200中形成一暫時反轉型偏壓為約-0.05 T。此時，將一預定量之中性氣體經由位於形成區段200之外部端上之凸緣處之一組經方位定向之噴出閥以9 psi至20 psi注入至由(北部及南部)形成區段200之石英管室240界定之兩個形成容積中。接下來，自石英管240之表面上之一組天線產生一小RF(約數百千赫)場以便以中性氣體柱內之局部種子電離區域之形式形成預-預電離。接下來，對驅動脈衝快速反轉型磁場線圈232之電流施加一 θ 振鈴調變，此導致氣體柱之更總體預電離。最後，點火脈衝功率形成系統210之主要脈衝功率庫以驅動脈衝快速反轉型磁場線圈232以形成高達0.4 T之一正向偏壓場。此步驟可係時序的，以使得貫穿形成管240之長度均勻地產生正向偏壓場(靜態形成)或使得沿著形成管240之軸達成一連續蠕動場調變(動態形成)。

在此整個形成程序中，快速地發生電漿中之實際場反轉，在約5 μ s內。遞送至形成電漿之多吉瓦脈衝功率易於產生熱FRC，該熱FRC然後經由正向磁場之一時序調變(磁性蠕動)或在形成管210(形成軸向地指向侷限室100之一軸向磁場梯度)之軸向外部端附近之線圈組232之末幾個線圈中之暫時增加電流之應用而自形成區段200射出。該兩個(北部及南部)形成FRC經如此形成及加速且然後擴展至較大直徑之侷限室100中，其中準直

流線圈412產生一正向偏壓場以控制徑向擴展且提供均衡的外部磁通量。

一旦北部及南部形成FRC到達侷限室100之中間平面附近，該等FRC即碰撞。在該碰撞期間，北部及南部形成FRC之軸向動力能量由於該等FRC基本上合併成一單個FRC 450而大大地熱能化。在侷限室100中可使用各種電漿診斷以研究FRC 450之均衡。RFC系統10中之典型操作條件產生具有約0.4 m之分界面半徑及約3 m軸向延伸之合成FRC。又一些特性係：約0.1 T之外部磁場， $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 左右之電漿密度及高達1 keV之總電漿溫度。在無任何持續之情況下，亦即無經由中性射束注入或其他輔助手段之加熱及/或電流驅動，此等FRC之壽命限於約1 ms (原本特性組態衰變時間)。

非持續操作之實驗資料——習用體系

圖12展示排斥通量半徑 $r_{\Delta\phi}$ (其近似為分界面半徑 r_s)之一典型時間演變通量以圖解說明FRC 450之 θ 捏縮合併程序之動態。兩個(北部及南部)個別電漿團同時產生且然後在各別形成區段200外部以一超音速 $v_z \sim 250 \text{ km/s}$ 加速並在 $z = 0$ 之中間平面附近碰撞。在碰撞期間，電漿團軸向壓縮，後續接著一迅速徑向及軸向擴展(在最後合併以形成一FRC 450之前)。藉由詳細的密度分佈型量測及基於輻射熱計之斷層掃描來證實合併FRC 450之徑向及軸向動態。

來自FRC系統10之一代表性非持續排放之資料在圖13中展示為隨時間而變。FRC在 $t = 0$ 處起始。在圖13(a)中展示在機器之軸向中心平面處之排斥通量半徑。此資料係自恰好位於侷限室之不銹鋼壁內部之量測軸向磁場之一磁探針陣列獲得。該鋼壁在此排放之時間尺度上係一良好通量保存器。

在圖13(b)中展示來自位於 $z = 0$ 處之一6弦 $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ 干擾計之線積分密度。慮及垂直(y) FRC位移(如藉由輻射熱計斷層掃描所量測)，阿貝爾變換(Abel inversion)產生圖13(c)之密度等值線。在第一個0.1 ms期間之某一軸向及徑向攪動之後，FRC以一中空密度分佈型穩定下來。此分佈型相當平坦，在軸上具有實質密度，如典型2D FRC均衡所要求。

在圖13(d)中展示總電漿溫度，其係自壓力平衡導出且與湯姆森(Thomson)散射及光譜學量測完全一致。

來自整個排斥通量陣列之分析指示：FRC分界面之形狀(近似於排斥通量軸向輪廓)係自跑道形逐漸演變成橢圓形。在圖14中展示之此演變與自兩個FRC至一單個FRC之一逐漸磁再連接一致。事實上，粗略估計建議：在此特定例項中，在碰撞期間兩個初始FRC磁通量之約10%再連接。

在FRC壽命期間，FRC長度自3 m穩定地向下收縮至約1 m。在圖14中可見之此收縮建議：主要由對流能量損失支配該FRC侷限。由於分界面內部之電漿壓力比外部磁壓力更快地減小，因此在端區域中之磁場線張力軸向地壓縮FRC，從而恢復軸向及徑向均衡。針對圖13及圖14中論述之排放，當FRC均衡顯現為平息時，FRC磁通量、粒子存量及熱能量(分別為約10 mWb、 7×10^{19} 個粒子及7 kJ)在第一毫秒中粗略地減小一個數量級。

持續操作——HPF體系

圖12至圖14中之實例係在無任何持續之情況下衰變FRC之特性。然而，已對FRC系統10部署數個技術以將FRC侷限(內部核及邊緣層)進一步改良至HPF體系且持續該組態。

中性射束

首先，在來自八個中性射束注入器600之射束中垂直於 B_z 注入快速

(H)中性粒子。該等快速中性粒子之射束係自北部及南部形成FRC在侷限室100中合併成一個FRC 450之時刻起注入。主要藉由電荷交換而形成之該等快速離子具有電子回旋軌道(具有按FRC拓撲之尺度或至少比特性磁場梯度長度尺度大得多之基本半徑)，此有助於FRC 450之方位電流。在某一分率之排放之後(在噴射之後的0.5 ms至0.8 ms之後)，一充分大的快速離子群顯著地改良內部FRC之穩定性及侷限性質(例如，見M.W. Binderbauer及N. Rostoker，Plasma Phys. **56**，第3部分，451頁(1996年))。此外，自一持續觀點而言，來自中性射束注入器600之射束亦係驅動電流及加熱FRC電漿之基本手段。

在FRC系統10之電漿體系中，快速離子主要在電漿電子上減慢。在一排放之早期部分期間，快速離子之典型軌道平均減慢時間為0.3 ms至0.5 ms，此導致顯著FRC加熱(主要為電子)。由於內部FRC磁場係固有低的(針對一0.1 T外部軸向場，平均約0.03 T)，因此該等快速離子導致分界面外部之大的徑向偏離。若中性氣體密度在分界面外部過高，則快速離子將易受電荷交換損失。因此，部署於FRC系統10上之壁吸氣及其他技術(諸如有助於氣體控制之電漿槍350及磁鏡插塞440以及其他)趨於最小化邊緣中性粒子且達成快速離子電流之所需積累。

丸粒注入

當在FRC 450內積累一顯著快速離子群時，藉助較高電子溫度及較長FRC壽命，將冰凍H或D丸粒自丸粒注入器700注入至FRC 450，以持續FRC 450之FRC粒子存量。預期之削磨時段足夠短以提供一顯著FRC粒子源。此速率亦可藉由以下而增加：藉由當在丸粒注入器700之桶或注入管中時且在進入侷限室100之前將個別丸粒破碎成較小碎片來加大所注入件

之表面積，此係可藉由透過收緊恰在進入侷限室100之前的注入管之最後一段之彎曲半徑而增加丸粒與注入管之壁之間的摩擦來達成之一步驟。藉助於變更12個桶(注入管)之點火序列及速率以及破碎率，可能調諧丸粒注入系統700以提供恰好所期望位準之粒子存量持續。繼而，此有助於維持FRC 450中之內部動力壓力以及FRC 450之持續操作及壽命。

一旦經削磨原子遭遇FRC 450中之顯著電漿，其即變得完全電離。所得冷電漿組分然後由原本FRC電漿碰撞加熱。用以維持一所期望FRC溫度所必需之能量基本上由射束注入器600供應。在此意義上而言，丸粒注入器700與中性射束注入器600一起形成維持一穩定狀態且持續FRC 450之系統。

CT注入器

作為對丸粒注入器之一替代，提供一緊湊環體(CT)注入器，其主要用於填裝燃料場反轉型磁場結構(FRC)電漿。CT注入器720包括一磁化共軸電漿槍(MCPG)，如在圖21中所展示，其包含共軸圓柱形內電極722及圓柱形外電極724、定位於內電極726內部之一偏壓線圈以及在與CT注入器720之排放部相對置之一端上之一電制動件728。氣體通過一氣體注入埠730注入至內電極722與外電極724之間的一空間中且藉由排放而自此氣體產生一球馬克狀電漿並藉由洛倫茲(Lorentz)力將該電漿推出電漿槍。如在圖22A及圖22B中所展示，一對CT注入器720在侷限容器100之中間平面之相對置側上及附近耦合至侷限容器100，以將CT注入至侷限容器100內之中心FRC電漿中。CT注入器720之排放端經定向以與侷限容器100之縱向軸所成之一角度朝向侷限容器100之中間平面，此類似於中性射束注入器615。

在一替代實施例中，如在圖23A及圖23B中所展示，CT注入器720包含一漂移管740，漂移管740包括耦合至CT注入器720之排放端之一細長圓柱形管。如所繪示，漂移管740包含圍繞該管定位且沿著該管軸向間隔開之漂移管線圈742。繪示沿著管之長度之複數個診斷埠744。

CT注入器720之優勢係：(1)對經注入CT之粒子存量之控制及可調整性；(2)沈積溫熱電漿(替代低溫丸粒)；(3)系統可在重複速率模式中操作以便允許連續填裝燃料；(4)系統亦可在經注入CT攜載嵌入式磁場之情況下恢復某些磁通量。在用於實驗目的之一實施例中，一外電極之內徑係83.1 mm，且一內電極之外徑係54.0 mm。內電極722之表面較佳地塗佈有鎢以便減少出自電極722之雜質。如所繪示，偏壓線圈726安裝於內電極722之內側。

在新近實驗中，達成高達約100 km/s之一超音波CT平移速度。其他典型電漿參數如下：電子密度約 $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、電子溫度約30-50 eV，以及粒子存量約 0.5×10^{19} 至 1.0×10^{19} 。CT之高動力壓力允許經注入電漿深深地穿透至FRC中且將粒子沈積於分界面內側。在新近實驗中，FRC粒子填裝燃料已導致由CT注入器提供之FRC粒子存量之約10%至20%，此成功地證明可容易地執行填裝燃料而不擾亂FRC電漿。

鞍型線圈

為達成穩定狀態電流驅動且維持所需離子電流，期望防止或顯著減少由於電子-離子摩擦力所致的電子向上自旋(由碰撞離子電子動量轉移所致)。FRC系統10利用一發明性技術以經由一外部施加之靜態磁偶極場或磁四極場提供電子破碎。此係經由圖15中所繪示之外部鞍型線圈460實現。來自鞍型線圈460之橫向施加徑向磁場引致旋轉FRC電漿中之一徑向

電場。所得軸向電子電流與徑向磁場相互作用以對電子產生一方位破碎力 $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$ 。針對FRC系統10中之典型條件，電漿內部之所需施加磁偶極(或四極)場需要僅為約0.001 T以提供充分電子破碎。約為0.015 T之對應外部場足夠小以便不致使相當可觀之快速粒子損失或其他消極影響侷限。事實上，所施加之磁偶極(或四極)場有助於抑制不穩定性。結合切向中性射束注入及軸向電漿注入，鞍型線圈460提供關於電流維持及穩定性之一額外位準之控制。

磁鏡插塞

磁鏡插塞440內之脈衝線圈444之設計准許具有適度(約100 kJ)電容能量之高磁場(2 T至4 T)之本端產生。針對磁場之形成(通常為FRC系統10之當前操作)，形成容積內之所有場線皆在磁鏡插塞440處穿過束縮部442，如圖2中之磁場線所建議，且不發生電漿壁接觸。此外，與準直流分流器磁體416串聯之磁鏡插塞440可經如此調整以將場線導引至分流器電極910上，或以一端部尖點組態(未展示)外擴該等場線。後一情形改良穩定性且抑制平行電子熱傳導。

磁鏡插塞440本身亦有助於中性氣體控制。由於藉由插塞之小氣體電導性(略小於500 L/秒)而顯著減少氣體回流至分流器300中，因此磁鏡插塞440准許在FRC形成期間噴出至石英管中之氬氣體之一較好利用。形成管210內部之多數剩餘噴出氣體被快速電離。另外，流動通過磁鏡插塞440之高密度電漿提供高效中性電離及因此一高效氣體障壁。結果，來自FRC邊緣層456之在分流器300中再循環之多數中性粒子不返回至侷限室100。另外，與電漿槍350之操作相關聯之中性粒子將多數被侷限至分流器300。

最後，磁鏡插塞440趨於改良FRC邊緣層侷限。藉助介於20至40之範圍內之磁鏡比(插塞/侷限磁場)，且藉助在北部與南部磁鏡插塞440之間的一15 m長度，邊緣層粒子侷限時間 τ_{\parallel} 增加高達一個數量級。改良 τ_{\parallel} 容易地增加FRC粒子侷限。

假定自分界面容積453之徑向擴散(D)粒子損失由自邊緣層456之軸向損失(τ_{\parallel})平衡，則獲得 $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$ ，其中分界面密度梯度長度可改寫為 $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ 。此處， r_s 、 L_s 及 n_s 分別為分界面半徑、分界面長度及分界面密度。FRC粒子侷限時間為 $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ ，其中 $\tau_{\perp} = a^2/D$ 且 $a=r_s/4$ 。實體上，改良 τ_{\parallel} 導致經增加 δ (經減小分界面密度梯度及漂移參數)及因此經減小FRC粒子損失。由於 n_s 隨 τ_{\parallel} 增加，因此FRC粒子侷限之總改良大體而言稍微小於二次式。

τ_{\parallel} 之一顯著改良亦要求邊緣層456保持非常穩定(亦即，無 $n = 1$ 凹線、管套型或開放系統中通常有的其他MHD不穩定性)。電漿槍350之使用提供用於此較佳邊緣穩定性。在此意義上而言，磁鏡插塞440及電漿槍350形成一高效邊緣控制系統。

電漿槍

電漿槍350藉由線系結來改良FRC排出噴流454之穩定性。。來自電漿槍350之槍電漿係在無方位角動量之情況下闡述，此證明在控制FRC旋轉不穩定性方面係有利的。因此，電漿槍350係在無需較早之四極穩定技術之情況下控制FRC穩定性之一高效構件。結果，電漿槍350使得可能利用快速粒子之有益效應或達到如此揭示內容中所概述之混合動力FRC體系。因此，電漿槍350使得FRC系統10能夠藉助僅足以用於電子破碎但低

於將導致FRC不穩定性及/或導致劇烈快速粒子擴散之臨限值之鞍型線圈電流來操作。

如在上文論述之磁鏡插塞中所提及，若可顯著改良 τ_{\parallel} ，則所供應之槍電漿將可比於邊緣層粒子損失率(約 10^{22} /秒)。電漿槍所產生之電漿在FRC系統10中之壽命係在毫秒之範圍內。事實上，考量侷限在端部磁鏡插塞440之間的具有密度為 $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 且離子溫度為約200 eV之槍電漿，捕獲長度L及磁鏡比R分別係約15 m及20。由於庫侖碰撞(Coulomb collision)所致的離子平均自由路徑係 $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$ ，且由於 $\lambda_{ii} \ln R/R < L$ ，因此將離子侷限在氣體動態體系中。在此體系下之電漿侷限時間為 $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ ms}$ ，其中 V_s 係離子聲速。相比而言，此等電漿參數之經典離子侷限時間將係 $\tau_c \sim 0.5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7 \text{ ms}$ 。原則上，異常橫向擴散可縮短電漿侷限時間。然而，在FRC系統10中，若採取波姆擴散率(Bohm diffusion rate)，則槍電漿之估計橫向侷限時間為 $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ ms}$ 。因此，電漿槍將提供FRC邊緣層456之顯著再填裝燃料，及一經改良總FRC粒子侷限。

此外，槍電漿流可在約150微秒至200微秒中接通，此准許在FRC起動、平移及合併至侷限室100中之使用。若在 $t \sim 0$ 左右接通(FRC主庫啟動)，則槍電漿幫助持續當前之經動態形成及合併之FRC 450。來自形成FRC且來自電漿槍之組合粒子存量足以用於中性射束捕獲、電漿加熱及長期持續。若在 t (介於-1 ms至0 ms之範圍內)時接通，則槍電漿可使石英管210填充有電漿以電力噴出至石英管中之氣體，因此准許在減少的或甚至可能零噴出氣體之情況下的FRC形成。後者可需要足夠冷的形成電漿以准許反轉型偏壓磁場之快速擴散。若在 $t < -2 \text{ ms}$ 時接通，則電漿流可填充形

成區段200及侷限室100之形成及侷限區域之約 1 m^3 至 3 m^3 場線容積，其中一目標電漿密度為數個 10^{13} cm^{-3} ，足以允許在FRC到達之前的中性射束積累。然後可形成該等形成FRC且將其平移至所得侷限容器電漿中。以此方式，電漿槍350達成各種各樣之操作條件及參數體系。

電偏壓

邊緣層456中之徑向電場分佈型之控制以各種方式有益於FRC穩定性及侷限。藉助於在FRC系統10中部署之發明性偏壓組件，可能貫穿該機器自侷限室100中之中心侷限區域以外的區域將各種人為分佈之電位施加至一群組開放通量表面。以此方式，可橫跨恰在FRC 450外部之邊緣層456產生徑向電場。此等徑向電場繼而修改邊緣層456之方位旋轉且經由 $E \times B$ 速度剪力影響其侷限。邊緣層456與FRC核453之間的任何差動旋轉可繼而藉由剪力被傳輸至FRC電漿內部。結果，控制邊緣層456直接影響FRC核453。此外，由於電漿旋轉時之自由能量亦可引起不穩定性，因此此技術提供用以控制不穩定性之開始及生長之一直接手段。在FRC系統10中，適當邊緣偏壓提供對開放場線輸送及旋轉以及FRC核旋轉之一高效控制。所提供之各種電極900、905、910及920之位置及形狀允許用於不同群組之通量表面455且在不同及獨立電位處之控制。以此方式，可實現各種各樣之不同電場組態及強度，各自具有對電漿效能之不同特性影響。

所有此等發明性偏壓技術之一關鍵優勢系可自FRC電漿以外引起核及邊緣電漿行為之事實，亦即，無需使任何實體組件接觸中心熱電漿(此將對能量、通量及粒子損失具有嚴重牽連)。此具有對HPF概念之效能及所有潛在應用之一主要有利影響。

實驗資料——HPF 操作

快速粒子經由射束自中性射束槍600之注入在達成HPF體系方面起到重要作用。圖16圖解說明此事實。其繪示一組曲線，展示FRC壽命如何與射束脈衝之長度相關。所有其他操作條件皆針對包括此研究之所有排放保持恆定。資料在多次噴射上經平均且因此表示典型行為。顯而易見，較長的射束持續時間產生較長壽命之FRC。查看此證據以及在此研究期間之其他診斷特徵，證明射束增加穩定性且減少損失。由於射束捕獲變得低效(低於一特定電漿大小)，亦即，由於FRC 450實體大小縮小而不能攔截及捕獲所有注入射束，因此射束脈衝長度與FRC壽命之間的相關並不理想。FRC之收縮主要歸因於以下事實：針對特定實驗設置，在排放期間自FRC電漿之淨能量損失(大約自排放中途起，約4 MW)稍微大於經由中性射束饋送至FRC中之總功率(約2.5 MW)。將射束定位於較接近於容器100之中間平面之一位置處將趨於減少此等損失且延伸FRC壽命。

圖17圖解說明用以達成HPF體系之不同組件之效應。其展示一族典型曲線，繪示隨時間而變之FRC 450之壽命。在所有情形中，針對每一排放之整個持續時間注入一恆定、適量之射束功率(約2.5MW)。每一曲線表示組件之一不同組合。舉例而言，在無任何磁鏡插塞440、電漿槍350或來自吸氣系統800之吸氣之情況下操作FRC系統10導致FRC拓撲之旋轉不穩定性及損失之快速開始。僅添加磁鏡插塞440會延遲不穩定性之開始且增加侷限。利用磁鏡插塞440與一電漿槍350之組合進一步減少不穩定性且增加FRC壽命。最後，除電漿槍350及插塞440以外亦添加吸氣(於此情形中，Ti)產生最佳結果-所得FRC無不穩定性且展現最長壽命。自此實驗示範顯而易見，組件之完全組合產生最好效應且為射束提供最好目標條件。

如圖1中所展示，新近發現之HPF體系展現明顯經改良輸送行為。圖1圖解說明在習用體系與HPF體系之間的FRC系統10中之粒子侷限時間之改變。如可見，在HPF體系中已改良遠遠超出5倍。另外，圖1相對於先前習用FRC實驗中之粒子侷限時間詳述FRC系統10中之粒子侷限時間。關於此等其他機器，FRC系統10之HPF體系具有改良達5倍與接近於20倍之間的侷限。最後且最重要地，HPF體系中之FRC系統10之侷限標度之本質明顯地不同於所有先前措施。在FRC系統10中之HPF體系之建立之前，根據用以預測先前FRC實驗中之侷限時間之資料導出各種經驗性標度定律。所有彼等標度規則皆主要取決於比率 R^2/ρ_i ，其中 R 係磁場零位之半徑(機器之實體尺度之一粗略量測)且 ρ_i 係外部施加場中評估之離子拉摩半徑(所施加磁場之一粗略量測)。自圖1顯而易見，習用FRC中之長期侷限僅在大的機器大小及/或高磁場處係可能的。在習用FRC體系CR中操作FRC系統10趨於遵循彼等標度規則，如圖1中所指示。然而，HPF體系極為優異且展示可在無大的機器大小或高磁場之情況下獲得好得多的侷限。更重要地，自圖1亦顯而易見，與CR體系相比，HPF體系導致具有減小的電漿大小之改良侷限時間。如下文所闡述，針對通量及能量侷限時間亦可看出類似趨勢，其在FRC系統10中亦已增加達3倍至8倍以上。因此，HPF體系之突破達成用以持續及維持FRC系統10中之FRC均衡以及未來之較高能量機器之適度射束功率、較低磁場及較小大小之使用。較低操作與構建成本以及降低之工程設計複雜度亦與此等改良並進。

針對進一步比較，圖18展示隨時間而變之來自FRC系統10中之一代表性HPF體系排放之資料。圖18(a)繪示在中間平面處之排斥通量半徑。針對此等較長時段，傳導鋼壁不再如一通量保存器一樣好，且該壁內部之

磁探針增加有該壁外部之探針以適當地計及穿過鋼之磁通量擴散。相比於如圖13中所展示之習用體系CR中之典型效能，HPF體系操作模式展現400%以上的較長壽命。

在圖18(b)中展示線積分密度跡線之一代表性線，其阿貝爾變換補充(密度輪廓)在圖18(c)中。相比於如圖13中所展示之習用FRC體系CR，電漿貫穿脈衝較為靜止，指示極穩定操作。在HPF噴射中峰值密度亦稍微較低，此係如圖18(d)中所展示之較熱總電漿溫度(高達2倍)之一結果。

針對圖18中圖解說明之各別排放，粒子及通量侷限時間分別係0.5 ms、1 ms及1 ms。在進入排放狀態後一參考時間1 ms處，所儲存電漿能量係2 kJ而損失係約4 MW，使得此目標極適合於中性射束持續。

圖19概述呈一新建立之實驗性HPF通量侷限標度形式之HPF體系之所有優勢。如在圖19中可看出，基於在 $t = 0.5$ ms之前及之後(亦即， $t \leq 0.5$ ms及 $t > 0.5$ ms)進行之量測，對於一給定分界面半徑(r_s)，通量侷限(且類似地，粒子侷限及能量侷限)粗略地隨電子溫度(T_e)之平方而按比例調整。具有一正功率 T_e 。(而非一負功率)之此強標度與藉由習用托卡馬克(tokomaks)所展示之標度(其中侷限通常與電子溫度之某一幕成反比例)完全相反。此標度之表現係HPF狀態及大軌道(亦即，軌道按FRC拓撲之尺度及/或至少按特性磁場梯度長度尺度)粒子群之一直接結果。根本地，此新標度實質上偏向於高操作溫度且達成相對適度大小之反應器。

利用HPF體系提供之優勢，可達成由中性射束驅動且使用適當丸粒注入之FRC持續或穩態，此意味著全域電漿參數(諸如電漿熱能量、總粒子數、電漿半徑及長度以及磁通量)可持續處於合理位準下而無顯著衰變。為了比較，圖20展示依據隨時間而變之FRC系統10中之一代表性HPF

體系排放之曲線A及針對隨時間而變之FRC系統10之一預計代表性HPF體系排放之曲線B中之資料，其中FRC 450在中性射束脈衝期間係持續的而無衰變。對於曲線A，在約6 ms之一作用射束脈衝長度期間，具有介於約2.5 MW至2.9 MW之範圍內之總功率之中性射束注入至FRC 450中。在曲線A中繪示之電漿反磁性壽命係約5.2 ms。更新近資料展示可利用約7 ms之一作用射束脈衝長度達成約7.2 ms之一電漿反磁性壽命。

如上文關於圖16所述及，由於射束捕獲變得低效(低於一特定電漿大小)，亦即，由於FRC 450實體大小縮小而不能攔截及捕獲所有注入射束，因此射束脈衝長度與FRC壽命之間的相關性並不理想。FRC之縮小或衰變主要歸因於以下事實：針對特定實驗設置，在排放期間自FRC電漿之淨能量損失(大約自排放中途起，- 4 MW)稍微大於經由中性射束饋送至FRC中之總功率(-2.5 MW)。如關於圖3C所述及，自中性射束槍600朝向中間平面之成角度射束注入改良射束-電漿耦合，即使在FRC電漿在注入時段期間縮小或以其他方式軸向地收縮之情況下。另外，適當丸粒填裝燃料將維持必需電漿密度。

曲線B係使用約6 ms之一作用射束脈衝長度及來自中性射束槍600之稍大於約10 MW之總射束功率之模擬運行之結果，其中中性射束應注入具有約15 keV之粒子能量之H (或D)中性粒子。由射束中之每一者注入之等效電流係約110 A。對於曲線B，與裝置軸所成之射束注入角度係約20°，目標半徑0.19 m。注入角度可在15°至25°之範圍內改變。射束將在方位角上沿平行電流方向注入。應最小化來自中性射束動量注入之淨側力以及淨軸向力。正如曲線A，快速(H)中性粒子係自北部及南部形成FRC在侷限室100中合併成一個FRC 450之時刻起注入自中性射束注入器600注入。

模擬係其中曲線**B**之建立針對背景電漿及均衡使用多維hall-MHD求解器、針對能量射束組件及所有散射程序使用基於完全動力Monte-Carlo之求解器且針對所有電漿物種使用眾多耦合輸送方程式以模型化相互作用的損失程序。輸送組件以實驗方式經校準且依據一實驗資料庫廣泛地進行基準測試。

如由曲線**B**所展示，FRC 450之穩態反磁性壽命將係射束脈衝之長度。然而，重要的是應注意，關鍵相關性曲線**B**展示，當射束被關斷時，電漿或FRC在彼時間開始衰變，但在之前並不衰變。該衰變將類似於在非射束輔助之排放中所觀察之衰變，該衰變可能超出射束關斷時間約1 ms，且其僅係對由固有損失程序驅動之電漿之典型的衰變時間之一反映。

儘管易於對本發明作出各種修改及替代形式，但在圖式中已展示且在本文中詳細闡述其特定實例。然而，應瞭解，本發明並不限於所揭示之特定形式或方法，相反，本發明意欲涵蓋在隨附申請專利範圍之精神及範疇內之所有修改、等效物及替代物。

在以上說明中，僅出於闡釋之目的，列舉特定術語以提供本發明揭示內容之一透徹理解。然而，熟習此項技術者將易於瞭解，無需此等特定細節以實踐本發明揭示內容之教示。

該等代表性實例及隨附申請專利範圍之各種特徵可以並未具體地且明確地列舉之方式相組合，以便提供本發明教示之額外有利實施例。亦明確地提及，實體群組之所有值範圍或指示皆出於原始揭示內容之目的以及出於限制所主張標的物之目的而揭示每一可能中間值或中間實體。

本文已揭示用於產生及維持一HPF體系FRC之系統及方法。應瞭解，本文所闡述之實施例系出於說明性目的，且不應視為限制該揭示內容

之標的物。熟習此項技術者將顯而易見在不背離本發明之範疇或精神之情況下產生各種修改、使用、替代、組合、改良、方法。舉例而言，讀者將理解，本文所闡述之處理行為之特定排序及組合僅系說明性的(除非另外提及)，且本發明可使用不同或額外處理行為、或處理行為之一不同組合或排序來執行。作為另一實例，一項實施例之每一特徵可與其他實施例中展示之其他特徵混合及匹配。可如所期望而類似地併入熟習此項技術者已知之特徵及處理程序。另外地且明顯地，可如所期望添加或減去若干特徵。相應地，本僅根據隨附申請專利範圍及其等效形式來限制本發明。

【符號說明】

10	場反轉型磁場結構系統
100	侷限室/容器/侷限容器
200	反轉型場 θ 捏縮形成區段/形成區段
210	脈衝功率形成系統/形成系統/形成管/石英管
220	滑架/單元
221	電容器
222	觸發器/觸發與控制系統
223	電感器
224	觸發與控制系統/轉儲電路
225	快速高電流切換器
230	條帶總成
232	線圈/脈衝快速反轉型磁場線圈/線圈組
240	石英管/石英管室/形成管
300	偏濾器室/偏濾器

- 310 遠端室/偏濾器室/室
- 350 電漿槍
- 400 磁系統
- 410 主要磁系統
- 412 準直流線圈/侷限線圈
- 414 準直流線圈/侷限線圈
- 416 準直流線圈/侷限線圈/準直流偏濾器磁體
- 420 準直流線圈/準直流磁鏡線圈/磁鏡線圈/第一組磁鏡線圈
- 430 準直流磁鏡線圈/磁鏡線圈/第二組磁鏡線圈
- 432 線圈/準直流磁鏡線圈/磁鏡線圈
- 434 準直流磁鏡線圈/磁鏡線圈/線圈
- 436 準直流磁鏡線圈/磁鏡線圈/線圈
- 440 磁鏡插塞/插塞/端部磁鏡插塞
- 442 小直徑通道/束縮部
- 444 磁鏡插塞線圈/磁鏡線圈/較緊湊脈衝磁鏡插塞線圈/最緊湊脈衝磁鏡線圈/線圈/脈衝線圈
- 450 場反轉型磁場結構/場反轉型磁場結構核
- 451 分界面
- 452 開放場線/磁通量表面/開放通量線
- 453 場反轉型磁場結構內部/分界面容積/場反轉型磁場結構核
- 454 噴流/端流電漿噴流/電漿噴流/排出噴流
- 455 磁通量表面/通量表面/同心通量層/內部開放通量表面
- 456 環形邊緣層/邊緣層/遠邊緣通量層/場反轉型磁場結構邊緣

層

- 460 鞍型線圈天線/外部鞍型線圈/鞍型線圈
- 600 中性射束注入器/射束注入器/中性射束槍
- 610 中性原子射束注入器系統/注入器系統/系統/側面注入器系統/中性射束系統
- 612 射頻電漿源/電漿源
- 614 磁屏
- 615 射束注入器/中性射束注入器
- 616 離子光學源及加速柵極
- 620 閘閥
- 622 中和器
- 624 偏轉磁體
- 628 離子轉儲部
- 630 瞄準裝置
- 634 低溫冷凍機
- 636 低溫板
- 640 中性原子射束注入器系統/注入器系統/系統
- 700 12桶丸粒注入器/丸粒注入器/丸粒注入系統
- 720 緊湊環體注入器
- 722 圓柱形內電極/內電極
- 724 圓柱形外電極/外電極
- 726 偏壓線圈
- 728 電制動件

730	氣體注入埠
740	漂移管
742	漂移管線圈
744	診斷埠
810	鈦沈積系統/除氣沈積系統
812	具有導引圍板之經加熱實心球體
820	鋰沈積系統/除氣沈積系統
822	具有導引噴嘴之原子爐
900	環形電極/電極
905	電極/點電極
910	電極/同心電極堆疊/偏濾器電極
920	電極/電漿槍陽極
CR	習用體系/習用場反轉型磁場結構體系

【發明摘要】

【中文發明名稱】

形成及維持高效能場反轉型磁場結構的系統及方法

【英文發明名稱】

SYSTEMS AND METHODS FOR FORMING AND MAINTAINING
A HIGH PERFORMANCE FRC

【中文】

本發明揭示一種高效能場反轉型磁場結構(FRC)系統，其包含：一中心侷限容器；兩個直徑向相對置之反轉型場 θ 捏縮形成區段，其耦合至該容器；及兩個分流器室，其耦合至該等形成區段。一磁系統包含：準直流線圈，其沿著FRC系統組件軸向定位；準直流磁鏡線圈，其在該侷限室與該等形成區段之間；及磁鏡插塞，其在該等形成區段與該等分流器之間。該等形成區段包含使得FRC能夠靜態及動態形成及加速之模組化脈衝功率形成系統。該FRC系統進一步包含中性原子射束注入器、丸粒或CT注入器、吸氣系統、軸向電漿槍及通量表面偏壓電極。該等射束注入器較佳地朝向該室之中間平面成角度。在操作中，在中性射束注入期間，包含電漿熱能量、總粒子數、半徑及經捕獲磁通量之FRC電漿參數可持續處於一恆定值或附近而無衰變。

【英文】

A high performance field reversed configuration (FRC) system includes a central confinement vessel, two diametrically opposed reversed-field-theta-pinch formation sections coupled to the vessel, and two divertor chambers coupled to the formation sections. A magnetic system includes quasi-dc coils

axially positioned along the FRC system components, quasi-dc mirror coils between the confinement chamber and the formation sections, and mirror plugs between the formation sections and the divertors. The formation sections include modular pulsed power formation systems enabling static and dynamic formation and acceleration of the FRCs. The FRC system further includes neutral atom beam injectors, pellet or CT injectors, gettering systems, axial plasma guns and flux surface biasing electrodes. The beam injectors are preferably angled toward the midplane of the chamber. In operation, FRC plasma parameters including plasma thermal energy, total particle numbers, radius and trapped magnetic flux, are sustainable at or about a constant value without decay during neutral beam injection.

【指定代表圖】

圖23A

【代表圖之符號簡單說明】

720	緊湊環體注入器
722	圓柱形內電極/內電極
724	圓柱形外電極/外電極
726	偏壓線圈
728	電制動件
730	氣體注入埠
740	漂移管
742	漂移管線圈
744	診斷埠

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種用於產生及維持具有一場反轉型磁場結構(FRC)之一磁場之方法，其包括以下步驟：

在一侷限室中圍繞一電漿形成一FRC，及

藉由自中性射束注入器將快速中性原子之射束朝向該侷限室之中間平面以一角度注入至該FRC電漿中且將一緊湊環體電漿注入至該FRC中，將該FRC維持於一恆定值或附近而無衰變。

