



(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 201947609 A

(43) 公開日：中華民國 108 (2019) 年 12 月 16 日

(21) 申請案號：107115635

(22) 申請日：中華民國 107 (2018) 年 05 月 08 日

(51) Int. Cl. : **G21B1/05 (2006.01)**

(71) 申請人：開曼群島商阿爾發環國際有限公司 (開曼群島) ALPHA RING INTERNATIONAL LTD. (KY)

開曼群島

(72) 發明人：黃 耀輝 WONG, ALFRED Y. (US)

(74) 代理人：陳長文

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：56 項 圖式數：25 共 141 頁

(54) 名稱

減少相互作用反應物間庫侖障壁的技术方案

(57) 摘要

用於產生和控制核聚變反應的方法，裝置，設備和系統。離子由電場和磁場驅動，且由於離子和中性粒子耦合，氫原子或其他中性物質(中性粒子)在約束區域發生旋轉。可控聚變反應包含一系列反應，包括諸如質子-硼-11 聚變反應的不產生中子的反應。

Methods, apparatuses, devices, and systems for producing and controlling and fusion activities of nuclei. Hydrogen atoms or other neutral species (neutrals) are induced to rotational motion in a confinement region as a result of ion-neutral coupling, in which ions are driven by electric and magnetic fields. The controlled fusion activities cover a spectrum of reactions including aneutronic reactions such as proton-boron-11 fusion reactions.

指定代表圖：

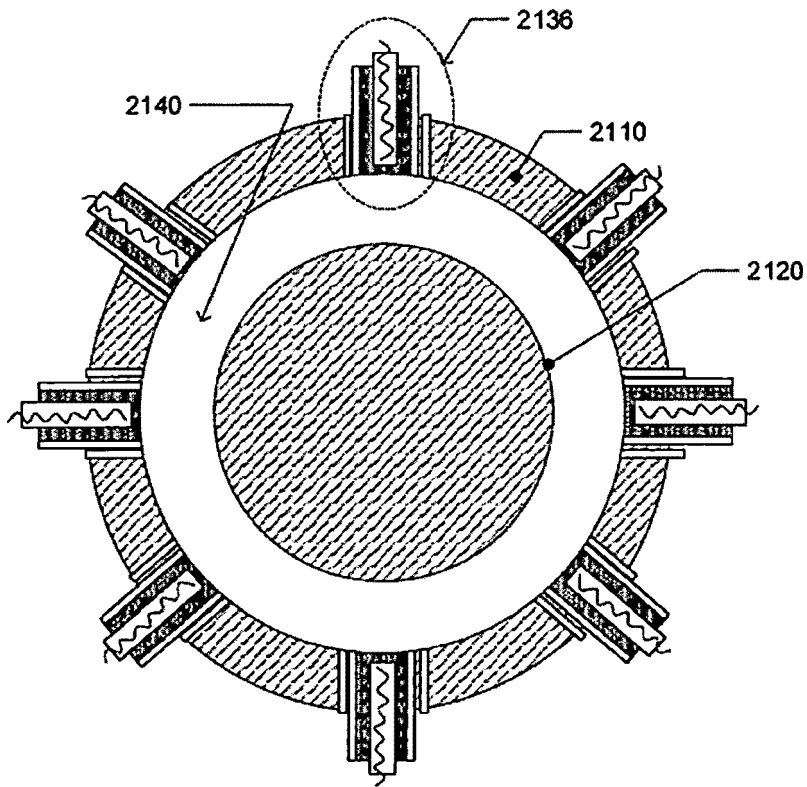
符號簡單說明：

2110 . . . 外部電極

2120 . . . 內部電極

2136 . . . 電子發射裝置

2140 . . . 環形區域



【圖 21a】

【發明說明書】

【中文發明名稱】

減少相互作用反應物間庫侖障壁的技术方案

REDUCING THE COULOMBIC BARRIER TO INTERACTING
REACTANTS

【技術領域】

【0001】 本發明涉及核間反應及用於引發和維持該核間反應的反應器。

【先前技術】

【0002】 20世紀50年代以來，科技界一直在努力實現可控、經濟上可行的核聚變。由於許多原因，核聚變是一個非常理想的能源來源，但經過數十億美元和數十年的研究，以核聚變為可持續的清潔能源來源的想法已成為黃粱美夢。我們所面臨的挑戰是找到一種以經濟、安全、可靠和對環境友好的方式維持聚變反應的方式。這個挑戰證明是極為困難的。對這一技術的普遍觀點是，在聚變成為發電的可行選擇之前還有25-50年的路要走 – 就像老玩笑一樣“聚變是未來的能源 -- 而且總是會在未來”(“Next ITERation?”, Sep. 3, 2011, The Economist)。

【0003】 先前對於大規模聚變的研究主要集中在兩種方法：慣性約束融合（ICF）和磁約束融合。ICF嘗試通過壓縮和加熱針頭大小的小球形狀的聚變反應物（例如氘和氚的混合物）來引發聚變反應。燃料通過將高能量的雷射光束、電子束或離子束傳遞到燃料靶而被激勵，導致目標燃料的加熱外層爆炸並產生衝擊波，該衝擊波通過燃料顆粒向內傳播，壓縮和加熱聚變反應物，從而引發聚變反應。

【0004】 在提交本專利申請時，最成功的ICF計畫是國家點火裝置（NIF），該建築費用接近35億美元，2009年完成。NIF達到了一個里程碑，使燃料顆粒放出比輸入更多的能源，但是截止2015年，NIF實驗只能達到點火所需能量的1/3左右。關於可持續反應，ICF聚變反應最長的時間是150皮秒。即使ICF的努力實現了點火條件，使其成為可行的能源仍然存在很多障礙。例如，需要從反應室中移除熱量而不會干擾燃料目標和驅動齒輪的解決方案，還需要緩和聚變裝置的短壽命的解決方案，這是由於聚變反應物的放射性副產物：氘和氚反應產生中子。

【0005】 第二個主要研究方向，磁約束聚變，嘗試通過使用磁場以等離子體形式約束熱聚變燃料來誘導聚變。這種方法旨在延長離子近距離接觸的時間，以及增加聚變的可能性。磁性聚變裝置對電荷粒子施加磁力，使得當與向心力平衡時，粒子在等離子體內以圓形或螺旋形路徑移動。磁約束防止熱等離子體接觸其反應器壁。在磁約束中，聚變完全發生在等離子體內。

【0006】 磁約束的大多數研究是基於托卡馬克（Tokamak）設計，其中熱等離子體被約束在環形磁場內。新澤西州普林斯頓的托卡馬克聚變測試反應堆（TFTR）是世界上第一個用50/50氘/氚組成的等離子體進行廣泛科學實驗的磁聚變裝置。建於1980年，最初期待TFTR終將實現聚變能源，但最終未達到這一目標，其於1997年關閉。迄今為止，任何托卡馬克的最長等離子體持續時間為6分30秒，是法國的Tore Supra tokamak持有。目前磁約束聚變的努力集中在國際熱核實驗堆（ITER），這是一個2013年開始建設的托卡馬克反應堆。截至2015年6月，建築成本已超過140億美元，預計到2019年間建成，該設施預計將從2027年開始進行氘氚

試驗。目前該專案的成本估計超過500億美元，成本可能會持續上升。最近，由參議院撥款的能源和水事發展小組委員會發佈了一項建議，即美國退出ITER專案。由於市場現實以及托卡馬克聚變發電設計的固有局限性，許多分析師懷疑，諸如ITER等聚變反應堆將成為商業上可行的裝置。

【0007】 馬里蘭州大學馬里蘭州離心實驗（MCX）正在研究一種替代形式的磁性約束。它將測試離心約束和速度剪切穩定的概念。在本實驗中，在存在磁場的設計中，電容器通過氫氣從圓柱形陰極排出到周圍的真空室。正交電場和磁場（表示為 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ）產生驅動熱電離等離子體（ $> 10^5 \text{K}$ ）繞放電電極旋轉的力。由於等離子體邊界溫度的顯著變化，不可避免地存在顯著影響等離子體流的冷中性物質。研究集中在中性粒子的影響，並且他們認為“阻礙所需的等離子體旋轉”是聚變條件需要的。“中性物質”或簡稱“中性粒子”是具有中性電荷的原子或分子，即它們具有相同數量的電子和質子，在原子的設計中這一數位為原子數。離子或電離原子或其它粒子具有電荷，即，其具有比質子至少多一個電子或至少比電子多一個質子。

【0008】 已經考慮了不採用高電離等離子體的旋轉等離子體裝置用於核聚變研究，但是中性粒子一直被認為是達到聚變條件的阻礙。由於包括中性阻力和不穩定性在內的限制性作用，一位本領域研究人員認為，儘管“不是完全不可能但是仍然不太可能有單獨依靠旋轉等離子體實現自我維持的聚變反應堆。（綜述文章：ROTATING PLASMAS”，Lehnart, Nuclear Fusion 11 (1971)).

【0009】 所有可信的先前方法都面臨約束和工程問題。聚變反應堆

的總能量平衡 Q ，定義如下：

$$\text{【0010】 } Q = E_{\text{fusion}} / E_{\text{in}},$$

【0011】 其中 E_{fusion} 是通過聚變反應釋放的總能量，而 E_{in} 是用於產生反應的能量。目標是得到一個大於1或大於單位的 Q 值，從而創造一個可用的能源。歐洲聯合航空公司（JET）的官員聲稱已經實現了 $Q \approx 0.7$ ，美國國家點火裝置最近聲稱已經實現了 $Q > 1$ （忽略了其雷射器的非常大的能量損失）。 $Q = 1$ 的條件，稱為“損益兩平”，表示通過聚變反應釋放能量值等於能量輸入量。實際上，用於產生電力的反應堆應該顯示出遠大於1的 Q 值，使其在商業上可行，因為只有一部分聚變能被轉化為有用的形式。傳統思想認為，只有不存在大量中性粒子的強電離等離子體具有達到 $Q > 1$ 的可能。這些條件限制了在聚變反應器中可以實現的顆粒密度和能量約束時間。因此，該領域將勞森（Lawson）判據視為受控聚變反應的基準 --- 這一基準，在考慮到所有能源投入時，尚沒有人能實現。對於勞森判據或大體上相似的範式的追求，已導致聚變裝置和系統龐大、複雜、難以管理，昂貴，當然在經濟上就是不可行的。勞森判據的公式是三重向量積，如下所示：

$$\text{【0012】 } nT\tau_E > \frac{12k_B T^2}{E_{ch} \langle \sigma v \rangle}$$

【0013】 雖然勞森判據在這裡不再詳細討論了；在本質上，勞森判據表明，為達到點火條件，粒子密度(n)，溫度 (T)) 和約束時間(τ_E)必大於一個數，這個數取決於帶電聚變產物(E_{ch})的能量，玻爾茲曼常數(k_B)，聚變橫截面(σ)，相對速度(v)，和溫度。對於氘 - 氚反應，三重積的最小值發生在溫度 $T = 14\text{keV}$ ，三重積的值約為 $3 \times 10^{21}\text{keV s / m}^3$ (J. Wesson, "Tokamaks", Oxford Engineering Science Series No 48,

Clarendon Press, Oxford, 2nd edition, 1997.) 實際上，這個行業基準表明，使用氘氘聚變反應需要超過1.5億攝氏度的溫度才能實現正能量平衡。對於質子 - 硼11聚變，勞森判據表明所需溫度必須大幅度增加。更具體地， $n\tau \sim 10^{16}$ 釐米⁻³/s，比氘氘聚變高上百倍[來自*Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion: Fundamentals and Applications* by George H. Miley and S. Krupaker Murali].

^[0014] 勞森判據的一個方面是基於這樣的前提：熱能必須連續地添加到等離子體中以取代失去的能量，維持等離子體溫度並保持其完全或高度電離。特別地，傳統聚變系統中的主要能量損失源是由於在移動電子與熱等離子體中的離子相互作用時，電子軀致輻射和迴旋運動引起的輻射。勞森判據是針對聚變方法制定的，其中電子輻射損失是一個重要的因數，這是由於使用了具有高速移動的電子的熱的且高度電離的等離子體。

【0015】 因為傳統思想認為需要沒有顯著存在的中性粒子的高溫和強電離等離子體其，所以進一步認為，不可能存在廉價的物理約束反應。因此，最廣泛使用的方法涉及複雜而昂貴的方案以控制反應，例如用磁約束系統（例如，ITER托卡馬克）以及慣性約束系統(例如，NIF鐳射)。

【0016】 事實上，至少有一個原始資料承認認為不可能包含具有物理結構的聚變反應：“用於提供等離子體約束的最簡單和最明顯的方法是通過與材料壁的直接接觸，但是由於兩個根本原因是不可能的：牆壁會使等離子體冷卻，大多數牆壁材料會融化。我們回想一下，這裡的聚變等離子體需要 $\sim 10^8$ K的溫度，而金屬通常在低於5000 K的溫度下熔化。

（“Principles of Fusion Energy,” A. A. Harms et al.）。對極高溫度的需求是基於這樣的信念，即只有帶電荷的高能離子才能聚變，並且庫侖斥力

限制了聚變事件。該領域的現有教學依賴於絕大多數研究和專案的這一基本假設。

【0017】 在極少數設計中，研究人員會考慮減少庫侖障壁或排斥力（其排斥相互作用的正核）的方法，以減少引發和維持聚變所需的能量。這些方法和上述方法在很大程度上均因不可行而被忽略。

【0018】 在20世紀50年代，Luis Alvarez在加州大學伯克利分校使用氫氣泡室研究了 μ 介子催化核聚變。Alvarez's 的工作("Catalysis of Nuclear Reactions by μ Mesons." *Physical Review*. 105, Alvarez, L.W.; et al. (1957)) 證明核聚變發生在明顯低於熱核聚變所需溫度的溫度下。在理論上，提出即使在室溫或室溫下也會發生聚變。在這個過程中，帶負電荷的 μ 介子代替氫分子中的一個電子。由於 μ 介子的品質比電子的品質大207倍，所以與原子分子相比，氫核比其近207倍。當原子核靠近在一起時，核聚變的可能性大大增加，直到在室溫下可能發生大量聚變反應。

【0019】 雖然 μ 介子催化的聚變受到一些關注，但是用 μ 介子催化聚變作為能源的努力還沒有成功。目前用於產生大量 μ 介子的技術需要大量能量，遠遠超過由催化核聚變反應產生的能量，從而不能達到損益兩平或 $Q > 1$ 。此外，每個 μ 介子“粘”到由氘原子核（氘的原子核）與氚原子核（氚的原子核）（使得“卡住的” μ 介子從催化迴圈中脫離）產生的 α 粒子的幾率只有1%，這意味著每個 μ 介子只能催化幾百個氘 - 氚核聚變反應。因此，這兩個因素 -- μ 介子太昂貴而不太容易產生以及 μ 介子太容易粘到 α 粒子- μ 介子催化聚變限制在實驗室。為了產生有用的 μ 介子催化聚變反應，反應器將需要更便宜，更有效的 μ 介子源和/或每個 μ 介子催化更多的聚變反應的方式。迄今為止，還沒有發現可行的方法甚至理論上也沒有。

【0020】 1989年3月，Martin Fleischmann和Stanley Pons向電分析化學雜誌提交了一篇文章，該文章報導他們發現了一種通過現在通常被稱為“冷聚變”的方法來減少庫侖障壁。他們認為他們已經觀察到了核反應副產物和小臺式實驗產生的大量熱量，該實驗涉及鈹電極表面上的重水電解。冷聚變的一個解釋認為氫和其同位素可以在某些固體（如鈹）中以高密度被吸收。氫的吸收產生高分壓，減少了氫同位素的平均間隔，從而降低了障壁。另一個解釋是，鈹晶格中的正氫核的電子遮罩足以降低屏障。

【0021】 雖然Fleischmann-Pons的調查結果最初收到了極大關注，但科學界的接受在很大程度上是至關重要的，因為佐治亞理工大學的一個團隊很快就發現了他們的中子探測器的問題，德州農工大學發現他們的溫度計接線不良。這些實驗性的錯誤以及許多由知名實驗室試圖複製Fleischmann-Pons實驗的失敗的嘗試，科學界得出的結論是，任何積極的實驗結果都不應歸因於“聚變”。部分由於公眾的關注，美國能源部（DOE）組織了一個專門小組來審查冷聚變的理論和研究。美國能源部首先在1989年11月和2004年再一次得出結論，迄今為止的結果並沒有提供有說服力的證據表明“冷聚變”的現象可以產生有用的能量。

【0022】 降低庫侖障壁的另一個嘗試是利用固體基質中的電子遮罩。首先在恆星等離子體中觀察到電子遮罩，如果遮罩因數僅改變幾個百分點會造成聚變率改變五個數量級(Wilets, L., et al. "Effect of screening on thermonuclear fusion in stellar and laboratory plasmas." *The Astrophysical Journal* 530.1 (2000): 504.). Wilets 發現: 等離子體中的熱核聚變速率受障壁穿透的控制。障壁本身由聚變核的庫侖排斥控制。因為

障壁勢能出現在Gamow公式的指數中，所以結果對電子和正離子在等離子體中的遮罩效果非常敏感。遮罩降低了障壁，從而提高了聚變反應率；原子核帶電越大，遮罩就越重要。

【0023】 Robert Indech的美國專利公開號US2005 / 0129160A1中提出了試圖利用該電子遮罩效應產生點火條件的一個例子。在這個申請中，Indech描述了當電子由於施加的電勢而集中在錐形結構的頂部時，位於微觀錐形結構的尖端附近的兩個氘核之間的帶正電排斥力的電子遮罩。如所公開的，這些錐體排列在3釐米×3釐米的表面上。

【0024】 雖然Indech等人已經意識到潛在的電子遮罩降低了聚變反應堆的庫侖障壁，但是已經取得成功的任何努力是令人懷疑的。大多數這些努力似乎提出了點燃方法，而不是持續和受控的聚變反應。儘管在ICF、磁約束聚變和減少庫侖障壁的各種方法方面都做出了努力，但目前還沒有商業上可行的聚變反應器設計。

【發明內容】

【0025】 本公開涉及反應器的設計和操作的各個方面。特別的是通過反應器設計和操作，採用電子遮罩來降低兩個聚變核之間的庫侖障壁，電子遮罩由富電子區域中提供，從而促進了聚變反應的發生。

【0026】 本公開的一個方面涉及一種含有如下特徵的反應器：(a) 至少部分地圍成約束區域，帶電粒子和中性粒子在該約束區域內旋轉；(b) 鄰近或靠近所述約束區域的多個電極；(c) 控制系統，包括電壓源和/或電流源，在多個電極中的至少兩個電極之間施加電勢，其中所施加的電勢單獨或者與磁場一起在所述約束區域內產生電場，驅動和/或維持所述約束區域內的所述帶電粒子和所述中性粒子的旋轉運動，和 (d) 放在約束區

域中或鄰近所述約束區域的反應物，在運行期間，中性粒子和該反應物之間的反復碰撞產生反應物的相互作用，該相互作用釋放能量並產生具有不同於中性粒子原子核和反應物的原子核核品質的產物，其中所述富電子區域中電子數目比帶正電粒子數目至少高出約 10^6 /立方釐米。

【0027】 在一些實施例中，所述多個電極圍繞所述約束區域沿方位角分佈，其中控制系統通過向多個電極施加時變電壓來引起帶電粒子和電中性物質在約束區域中旋轉。一些實施例中，反應器的通過約束區域內電場與施加的磁場之間的相互作用引起約束區域中的帶電粒子和中性粒子的旋轉。

【0028】 在反應器的操作期間，富電子區域具有以下一個或多個特徵：(i) 至少約 10^6 伏/米的電場強度，(ii) 電子的平均溫度為約10,000克耳文至50,000克耳文，(iii) 電子密度為約 10^{10}cm^{-3} 至約 10^{23}cm^{-3} ，(iv) 電子與正離子的比率在約 $10^6 : 1$ 和 $10^8 : 1$ 之間，(v) 中性物質的平均能量約為0.1eV和2eV之間，(vi) 中性物質的密度至少為約 $10^{16} / \text{cm}^3$ (在一些設計中，約在 $10^{16} / \text{cm}^3$ 到 $10^{18} / \text{cm}^3$ 之間) 和/或(vii) 從束壁延伸到約束區域中的距離為約50納米至約50微米。

【0029】 在一些實施例中，反應器包括在約束區域中或與約束區域相鄰的電子發射器，在操作期間，電子發射器在約束區域中產生電子。電子發射器附接到或嵌入所述約束壁中在一些設計中，約束壁和所述發射器之間的一個或多個絕緣層，所述絕緣層提供絕熱和/或電絕緣。絕緣層由氧化鋯，氧化鋁，氮化鋅和氧化鎂中的任意一者或其組合形成。在一些設計中，電子發射器的至少一個點凸起到所述約束區域中，從而增加電子的產生。

【0030】 在一些設計中，反應器包括熱連通到燈絲的電子發射器，其中控制系統通過燈絲向電子發射器施加電流。反應器可以包括一個溫度感測器，所述溫度感測器被配置為監測所述電子發射器的溫度，其中所述控制系統被配置為依據所監測的溫度將電流施加到所述燈絲。

【0031】 在一些實施例中，反應器有雷射器，雷射器配置成通過約束區域發射光束到電子發射器或約束壁上，使得鐳射與電子發射器或所約束壁相互作用，電子被發射到約束區域。還可以有一個溫度感測器，溫度感測器監測電子發射器的溫度，控制系統基於所監測的溫度來控制發射到電子發射器上的鐳射。

【0032】 在一些實施例中，反應器的操作期間，所述電子發射器配置成移入和移出所述約束區域。控制系統控制所述電子發射器在約束區域內的移動，例如，控制電子發射器的溫度（如，用溫度感測器測量）和電子的產生。

【0033】 電子發射器包括硼或含硼的材料。在一些設計中，反應物包含硼-11。在一些設計中，產物的原子核品質大於所述中性物質和所述反應物的原子核品質。。

【0034】 在一些實施例中，反應器還可以包括能量轉換裝置，所述能量轉換裝置從所述反應器提取熱能，帶電反應產物的動能和/或機械能，並將所述熱能，動能和/或機械能轉換為可供在反應器外使用的電能和/或機械能。

【0035】 本公開涉及一種操作反應器的方法，該方法包括在反應器中的多個電極中的至少兩個之間施加電勢，其特徵如下：(a) 一個約束壁，至少部分圍成約束區域，(b) 多個電極，鄰近或靠近約束區域，(c) 控

制系統，包括電壓和/或電流源，在多個電極中的至少兩個電極之間施加電勢，其中所施加的電勢在約束區域內產生電場，和 (d) 設置在約束區域內或附近的反應物。約束區域中的電場單獨作用或與磁場一起作用，引起和/或保持帶電粒子和中性物質在約束區域內的旋轉運動。此外，約束區域內靠近約束壁的富電子區域中，電子數目比帶正電粒子數目至少高出約 10^6 / 立方釐米。中性物和反應物之間的反復碰撞產生反應物的相互作用，該相互作用釋放能量並產生具有不同於任何中性物質原子核和反應物原子核品質的產物。

【0036】 在一些實施例中，多個電極在約束區域周圍沿方位角分佈，其中控制系統通過向多個電極施加時變電壓來引起帶電粒子和所電中性物質在約束區域中的旋轉運動。在一些實施例中，約束區域中的電場與所述磁場一起作用，引起和/或維持帶電粒子和中性粒子在約束區域中的旋轉。

【0037】 然後在多個電極之間施加電勢，富電子區域可能有如下特徵：(i) 有至少約 10^6 伏/米的電場強度，(ii) 電子的平均溫度為約 10,000 克耳文至 50,000 克耳文，(iii) 電子密度為約 10^{10}cm^{-3} 至約 10^{23}cm^{-3} ，(iv) 電子與正離子的比率在約 $10^6 : 1$ 和 $10^8 : 1$ 之間，(v) 中性物質的平均能量約為 0.1 eV 和 2 eV 之間，(vi) 中性物質的密度至少為約 $10^{16} / \text{cm}^3$ (在一些設計中，約在 $10^{16} / \text{cm}^3$ 到 $10^{18} / \text{cm}^3$ 之間) 和/或(vii) 從束壁延伸到約束區域中的距離為約 50 納米至約 50 微米。

【0038】 在一些實施例中，反應器包括在約束區域中或與約束區域相鄰的電子發射器，在操作期間，電子發射器在約束區域中產生電子。在一些設計中，該方法可以控制約束區域中的電子產生。

【0039】 例如，反應器包括熱連通到燈絲的電子發射器，其中控制系統通過燈絲向電子發射器施加電流。在一些設計中，通過將電子發射器移入或移出約束區域來控制約束區域中的電子產生。在一些情況下，通過控制來自指向電子發射器或約束壁的鐳射來控制約束區域中的電子的產生。

【0040】 在一些設計中，產物的原子核品質大於所述中性物質和所述反應物的原子核品質。相互作用是聚變反應——在一些設計中，該聚變反應是無中子反應。在一些實施例中，富電子區域中聚變反應發生速率約 10^{17} 至約 10^{22} 每秒每立方釐米。 在一些設計中，中性物質包括中性氫，氘和/或氦。

【0041】 在一些實施例中，反應器還可以包括能量轉換裝置，將反應器產生的熱能，帶電反應產物的動能和/或機械能，轉換為可供在反應器外使用的電能和/或機械能。

【0042】 將參考相關附圖更詳細地說明本公開的特徵。

【圖式簡單說明】

【0043】 圖**1a-c**是第一實施方案反應器的一些視圖。

【0044】 圖 **2a-b**示出了在約束壁內旋轉的帶電粒子和中性粒子的運動。

【0045】 圖 **3a-d**是中性粒子和帶電粒子與約束壁相互作用的示意圖。

【0046】 圖 **4a-e** 是非中子氫硼聚變反應階段圖示。

【0047】 圖 **5a-d**反向極性反應器示意圖。

【0048】 圖 **6a-f**是混合反應器示意圖。

【0049】 圖 7a-b是波粒反應器示意圖。

【0050】 圖 8a-b 是第一實施方案反應器的各種電極配置示意圖。

【0051】 圖 9a-c第一實施方案反應器的橫截面示意圖。

【0052】 圖 10a-d描繪了第一實施例的反應器，通過超導磁體施加軸向磁場。

【0053】 圖 11a-b 是第一種實施方案的反應器，其中永磁體在反應器中施加軸向磁場。

【0054】 圖 12a-b描繪了第一實施例的反應器，其中使用永磁體在約束區域中施加磁場。

【0055】 圖 13a-c是第一種實施例反應器的裝置圖。

【0056】 圖 14a-c是第一種實施例反應器的裝置圖。

【0057】 圖 15a-c環形磁體如何沿公共軸線定位從而產生基本上沿該軸線方向的磁場。

【0058】 圖 16a-c是第一實施例的反應器示意圖，其中使用環形磁體在約束區域中施加的磁場。

【0059】 圖 17a-c是第一實施例的反應器示意圖，其中使用徑向偏移磁體在約束區域中施加磁場。

【0060】 圖 18a-d是第一實施例的反應器示意圖，其中使用電磁體在約束區域中施加磁場。

【0061】 圖 19a-b 是反向電極性反應器的各種實施方案示意圖。

【0062】 圖 20a-b是可以放置在約束壁上的各種電子發射器示意圖。

【0063】 圖 21a-b可以放置在反應器約束壁上的電子發射模組示意

圖。

【0064】圖22是配置有鐳射的反應器，鐳射用以增加或控制來自電子發射器的電子發射。

【0065】圖 23a-c描繪了一種配置，其中核磁共振傳感用於確定反應器內氣體反應物的組成。

【0066】圖24描繪了如何設置控制系統以使用閉環回饋來操作反應器。

【0067】圖25 是可用於操作反應器的多級工藝流程的示意圖。

【實施方式】

前言

【0068】本文公開的各種實施方案涉及反應器以及在誘導兩個或多個原子核之間反應的條件下，以產生比輸入到反應器的能量更多的能量的方式操作這些的方法。本公開涉及反應，例如核聚變反應或簡單的聚變反應，儘管反應的方面可能定量地或定性地不同于傳統上被稱為核聚變的反應。因此，當在本公開的其餘部分中使用術語“聚變”時，該術語不一定意味著其具備傳統意義上核聚變的所有特徵。在本文公開的一些實施方案中，反應器可產生持續的聚變反應，使其適合作為可行的能量來源。如本文所述，持續的聚變反應是指一種聚變反應，其中反應器可以大於單位的狀態連續運行約一秒的週期。

【0069】在各種實施方案中，其中發生聚變反應的反應器被設計或構造成約束或限制旋轉物質，包括參與聚變反應的一個或多個原子核。各種結構被提供以約束旋轉物質。通常，雖然不一定必須，這些結構形成了一個堅實的物理外殼。如本文說明的，封閉結構可以具有許多形狀，例如

一般是圓柱形的形狀。可以用於物理外殼的合適結構如圖 1、7和6所示。

【0070】 忽略任何其他功能，反應器的壁通常用於將旋轉的物質限制在鄰近壁和內壁的區域中。壁的限制在於其限制旋轉物質使其在反應器內。如本文所述，反應器的該壁被稱為壁、約束壁或護罩。在各種實施方案中，該壁還具有其他功能：特別是作為電極，作為磁體，作為聚變反應物（例如硼化合物）的來源，和/或作為電子發射器。因為壁代替通過磁場和壓力波（如傳統的聚變方法中所做的那樣）而物理地約束反應物物質而並非是，所以該壁不同于任何傳統的聚變反應器的設計。反應器壁的其他功能，例如作為施加電壓差的電極，作為反應物材料源的磁體，電子發射器，提供了與傳統聚變反應器設計的額外的區別。

【0071】 在某些實施方案中，反應器包含所述的壁和壁形成的內部空間（其可以是環形形狀），其中反應物物質（包括大部分或很大百分比的中性粒子）旋轉並重複地撞擊反應器壁的表面，有時會與存在於壁中的物質發生聚變反應。當考慮到反應器的能量輸入時，所得到的反應可以達到平衡並導致 $Q > 1$ 。為了確保在特定能源發電的應用中聚變反應時間是可持續的，能量輸出與能量輸入之比應顯著大於1。這一假設考慮到利用聚變反應產生的能量來維持允許聚合發生的條件（例如，約束區域中的特定等離子體密度）所固有的低效率。。在某些實施方案中，該比例至少約為1.2。在某些實施方案中，該比例至少約為1.5。在某些實施方案中，該比例至少約為2。在某些實施方案中，反應器在可持續條件下連續操作至少約十五分鐘，或至少約一小時。在一個實例中，氫原子在反應器中旋轉並撞擊反應器壁中的硼或鋰原子進行聚變。在一些實施例中，反應器包括一個或多個電子發射器用以產生電子通量，該電子通量在運行期間產生強

場，以減小相互作用的原子核之間的庫侖排斥。

【0072】 反應物可以是能夠在反應器的約束壁的內部空間中支持聚變反應的任何物質。在不同實施方案中，反應物中的至少一種是在反應器內部區域內旋轉的物質。在一些設計中，兩種反應物都是旋轉物質。在一些設計中，反應物之一是旋轉的，另一種是物質保持靜止，例如當反應物嵌入限制旋轉物質的反應器壁中。在某些設計中，存在旋轉和靜止反應物的一些組合，使得在旋轉物質之間或在旋轉物質和固定物質之間發生聚變反應。在反應物質主要為旋轉物質的設計中，反應器的物理結構使得旋轉物質不必撞擊反應器壁的内表面來發生聚變反應。在一些設計中，旋轉物質受到力（諸如阻止它們撞擊反應器壁的力）的約束。在這樣的設計中，兩個旋轉物體在約束壁（例如，約束區域）的內部或沿著壁的表面聚變。在一些設計中，旋轉物質可以與位於環形區域內的固定物質（例如，靶物質）發生反應。

【0073】 在某些實施方案中，反應物是非中子反應的物質。在其它實施方案中，反應物是中子反應的物質。一種或兩種反應物也可以是中性或帶電荷的物質。有時將反應器中存在的物質稱為“粒子”。但是，這些物質只是分子或原子大小的顆粒。

【0074】 所公開的小尺寸，例如臺式的，非中子反應器不需要或需要相對較少中子輻射的生物遮罩。在本文所述的反應器中的聚變反應可以被表徵為“溫和聚變”，例如，在約1000K至3000K的溫度範圍內發生聚變反應，並且與“熱聚變反應堆”（例如托卡馬克反應堆）相比，更易於處理。由於聚變實質上是非中子的且“溫和”的材料，因此與“溫和聚變”反應器相關的成本會顯著降低。例如，在某些設計中，一個已建成的反應堆的

成本少於5萬美元。由於不需要輻射遮罩和會通常用於熱等離子體反應器的工業級硬體，因此所公開的小型反應器也可以具有小的重量和占地面積。

【0075】 物質在反應器中的旋轉運動可以通過多種機制賦予。一種機制通過施加相互作用的電場和磁場來實現旋轉。相互作用表現為作用於反應器中帶電粒子的勞倫絲力。例如在圖1a-c和 6中，該設計可以產生作用於帶電粒子的勞倫絲力。圖1a-c示出了勞倫絲驅動的反應器，其中反應器具有內部電極120，其中護罩（約束壁）是外部電極110。在施加的具有垂直分量的磁場146的存在下，電極之間的電場144對在電極之間行進的電荷粒子或帶電物質造成勞倫絲力。該力使之沿方位角方向旋轉，如圖1c所示。在另一類反應器設計中，通過將電勢或電勢變化依次施加到圍繞反應器壁在方位角佈置的多個電極而賦予帶電物質的旋轉運動。合適的反應器設計例子如圖7所示。

【0076】 在許多實施方案中，反應器以這樣的方式操作：使得旋轉的帶電物質與中性粒子相互作用並賦予那些中性物質角動量，從而建立反應器內的中性物質以及帶電物質的旋轉運動。在許多方案中，大多數旋轉物質是中性物質，且帶電物質是電離粒子，例如質子（ p^+ ）。如本文所述，該方法可以被稱為離子中性粒子耦合。圖2a示出了其中少數帶電粒子204使得周圍中性粒子206運動的離子中性粒子耦合過程。

【0077】 在各種實施例中，反應器設計成在反應器的內部局部區域中發射電子，相應的聚變事件發生在這一區域。再次參考圖2a，這些電子可以在約束壁210附近形成富電子區232。多餘電子的存在降低了庫侖障壁，從而增加了聚變的可能性。如本文其他地方所述，以這種方式發射電

子可以產生富自由電子區域，其減少兩個帶正電荷的原子核之間的固有的庫侖排斥，這些帶正電荷的原子核之間即可能發生核聚變反應。在某些實施方案中，電子發射發生在限制反應器內的旋轉物質的壁之上或相鄰處。在一個實例中，電子發射由被動結構--例如或嵌入或附著到反應器約束壁的含有硼的片或條帶提供。當反應器運行期間局部溫度升高時，這種結構發射電子。在其他實施方案中，使用獨立于反應器正常運行期間產生的加熱而受到控制的主動結構來實現電子發射。用於電子發射的主動結構的實例如圖**21a**和**21b**所示，其包括用於加熱各個電子發射器的獨立受控的電阻元件。

【0078】 本公開的另一方面涉及用於捕獲和轉化由反應器內的聚變反應產生的能量的結構或系統。一類能量捕獲系統提供直接獲得由聚變反應產生的 α 粒子行進產生的電能。這種能量轉換系統可以通過在所發射的 α 粒子路徑中產生施加電場來完成，該電場導致粒子減速並在與用於產生電場的電極相連接的電路中產生電流。另一類能量捕獲系統用以使用熱力發動機提供能量捕獲，例如包括渦輪機，熱交換器或其他用於將由聚變反應產生的熱能轉換成機械能的常規結構。這些和其他能量捕獲機制將在本公開中稍後討論。

中性粒子與壁的相互作用

【0079】 與反應器壁相互作用的中性物質提供與傳統聚變研究中使用的不同類型的相互作用。重複的相互作用發生在相對較大的體積上，其可以是緊鄰約束壁的内壁或内表面的環形空間。因為旋轉的中性粒子經常以較小的角度與壁彈性地相互作用，例如在斜向的或切線角度，它們可能立即離開壁，並以與其進入時相當的能量重新進入内部空間。圖**2b**示出了

中性粒子**206**在沿著約束壁**210**的表面移動時可能具有的軌跡路徑。當旋轉的中性粒子進入或撞擊壁時，它通常遇到可能與之發生反應或不反應的潛在的聚變物。當它不反應時，它重新進入內部空間，在其中繼續旋轉。以這種方式，它重複地與壁的表面相互作用，且在每個這樣的彈性碰撞中，幾乎沒有能量損失。

【0080】 在圖**3a-d**中示意性地示出了不導致聚變的一些粒子和壁的相互作用。雖然這些圖描述了包含硼**11**和/或鈦的相互作用，但當在約束壁中使用其它反應物材料時也可能發生這些相互作用。如圖 **3a**所示，在一小部分的中性粒子與壁相互作用中，中性粒子經歷與壁中的原子核（在這種設計中為硼**11**）的彈性碰撞，並且反彈後的中性粒子保持其進入相互作用時的大部分能量。在所有中性粒子和壁相互作用中，彈性碰撞通常具有最高的發生率。在圖**3b**所示很小一部分的碰撞中，中性粒子的原子核足夠接近壁中的原子的核，碰撞變為非彈性碰撞，這是由於當兩個核非常接近時發生的隧穿。圖**3c**描繪了可能發生的另一種相互作用；在這種設計中，中性粒子滲透到反應器壁中。當限制表面含有可吸收氫分子的諸如鈦或鈹的材料時，這種類型的碰撞可能會比較頻繁發生。

【0081】 圖**3d**描繪了帶電粒子（例如質子）與約束壁的非彈性碰撞。這種情況與諸如原子氫之類的中性粒子與約束壁（如上述圖**3a**中述）的頻繁彈性碰撞形成對比。當帶電粒子接近和離開約束壁時，粒子可能經歷制動輻射能量損失。這種能量損失是由帶電粒子和富電子區域中的電子之間的靜電相互作用引起的。由於靜電力，一些動能損失掉，並且發射諸如x射線的高能電磁輻射。在傳統集中試圖聚變電離粒子的聚變反應堆中，制動輻射可能導致巨大的能量損失。通過使用具有高比例中性粒子比

離子的弱電離等離子體，可以在很大程度上避免這些損失。

【0082】 在運動的中性原子核與壁中的原子核之間的某一部分隧穿作用中，可能發生核聚變。圖4a描述了當氫原子或質子與硼11原子聚變時發生的非中子聚變反應的階段。首先，在482中，以高速運動的質子與硼11原子碰撞，以及這兩個原子核聚變形成激發的碳核，如483所示。然而，激發的碳核的壽命很短，分解成鈹原子核和所發射的具有3.76MeV的動能的 α 粒子，如484所示。最後，在485中，新形成的鈹原子核幾乎立即分解成兩個 α 粒子，每個 α 粒子的動能為2.46MeV。圖4b-e描繪了約束壁412的表面和圖4a中所示相同的質子 - 硼11聚變反應的各個階段。圖4a描繪了以高速度向約束壁表面的硼11原子行進的質子。當中性氫原子接近其約束壁時，其通過電子富集區域432，其部分地遮罩兩個帶正電荷的核之間的排斥力。圖4c描繪了中性氫與硼原子聚變以形成碳原子的階段。在圖4d中，碳核已經分解成鈹原子核和一個 α 粒子。最後，在圖4e中，鈹原子核分解，發射另外兩個 α 粒子。因為潛在的反應物是中性粒子而不是離子，它們與約束壁表面中的原子的大部分相互作用是彈性碰撞。相比之下，進入壁的帶正電的粒子會因為靜電排斥力而偏轉，從而與壁上其他原子核保持距離。這些靜電相互作用導致帶電粒子失去能量；例如，碰撞是非彈性的。具有通過軌道電子在一定程度上被遮罩的帶正電荷的核的中性粒子，不會經歷相同的排斥力。因此，中性粒子更可能直接影響壁中的另一個原子。因此，使用中性粒子而不是離子增加了聚變反應的可能性，並且當不發生聚變反應時，相比離子，中性粒子更可能以更高的能量彈性地彈回。

【0083】 總的來說，旋轉的中性粒子經歷與壁的許多重複的相互作

用，一旦在產生聚變反應中那些未起到作用的中性粒子以相對較小的能量損失彈性回彈。如上所述，電中性粒子傾向於從壁上重新形成並具有足夠的能量，使得它們可以進入與壁的下一個相互作用中，這就有可能產生聚變反應。與壁的每個相互作用都有可能導致中性核與壁中原子核之間的聚變反應。

【0084】 當反應物是不同的物質（例如， ^{11}B 和 p^+ ）時，每單位體積的聚變速率由下式給出：

$$\text{【0085】 } dN/dT = n_1 n_2 \sigma v$$

【0086】 其中 n_1 和 n_2 是相應反應物的密度， σ 是在特定能量下的聚變橫截面， v 是兩個相互作用物質之間的相對速度。對於其中至少一種物質在約束區域中旋轉並且重複地撞擊包含第二物質的約束壁的系統，對於旋轉物質，物質的密度值可以在 10^{20} 釐米 $^{-3}$ 的數量級上，對於固定化物質（例如硼），物質的密度值可以在 10^{23} 釐米 $^{-3}$ 數量級，聚變橫截面的值可以在 10^{-32} 釐米 2 量級，並且相互作用物質的相對速度在 10^3 釐米/s的量級。相比之下，對於托卡馬克反應堆，每種物質的密度值數量級在 10^{14} 釐米 $^{-3}$ ，聚變橫截面數量級在 10^{-28} 釐米 2 ，相互作用物質的速度的數量級在 10^6 釐米/s左右。（基於“[Inertial Confinement Fusion.pdf](#)” by M. Ragheb dated on January 14, 2015.提供的資訊）。顯然，採用中性物質的體系，如本文所述，由於其較高的密度，具有強大的優勢。這種系統的單位體積的聚變能量的速率超過托卡馬克和慣性約束系統的速率至少約八個數量級。因此，本文公開的系統可以在托卡馬克或慣性約束系統約億分之一的體積中實現限定的能量產生速率。

庫倫障壁的降低

【0087】 如上所述，可信的先前的核聚變方法是對聚變反應物和所支持的環境通電以達到至少150,000,000K（13000eV）的極高溫度。這樣做是為了賦予聚變反應物足夠的動能來克服它們的自然靜電排斥。在這種環境中，每個反應物是具有固有正電荷的原子核，必須首先克服該核以允許聚變反應的某些可能性。

【0088】 本公開的某些實施例使用低得多的溫度；例如，在融聚變反應中約為2000K（0.17eV）。這些實施方案使用中性質物質作為一種或多種反應物和/或改變反應環境以減少反應物原子核之間的強的庫侖排斥力。可以以各種方式實現降低庫侖力，例如包括（i）在反應區域中提供富電子場和/或（ii）使反應物原子核的量子力學自旋對齊。取決於反應器的結構，用於減少庫侖排斥的裝置和方法可以有多種形式。下面的描述假設反應器包括外約束壁或護罩的環形空間。其他反應器結構同樣可以產生減少庫侖排斥的環境，從而支援聚變的發生，但是它們可以以不同於下述的這種方式來實現。

【0089】 以下作為圍繞約束電極的內表面附近環境的一種可能的解釋，該解釋不應被認為是對所公開的限制條件。在這種解釋中，反應物，特別是中性粒子以高速度旋轉並撞擊電極的內表面。同時，電子從約束壁或附近發射出來。快速旋轉的中性粒子具有很高的角速度，因此通過相關的離心力在約束壁的內表面施加極大的壓力。從壁的內表面發射的電子與這種力的方向相反。

【0090】 發射的電子將從其發射的位置擴散，例如遠離壁並朝向內部空間。然而，電中性粒子離心力將電子限制在靠近外部電極的內表面區域。所得到的與電極內表面相鄰的平衡力的薄區域具有強場，其減小反應

物核之間的庫倫排斥。

【0091】 力平衡可以用數學方式表示為 (i) 電子和中性粒子的溫度和密度乘積的梯度（遠離電子發射的壁面的方向）的平衡，和 (ii) 向內表面施加的離心力。離心力與中性粒子密度，徑向位置和角速度的平方的乘積成比例。

$$\text{【0092】 } \frac{\partial}{\partial r} (n_e K T_e + n_0 K T_0) = n_0 m_0 \omega^2 r$$

【0093】 在這個運算式中， r 是遠離約束電極內表面的徑向方向， K 是玻耳茲曼常數， T_e 和 T_0 是開爾文為單位的電子和中性粒子溫度， n_e 和 n_0 是電子和中性粒子的密度， n_0 是中性物質的密度， m_0 是一個旋轉中性物質（例如氫原子）的品質， ω^2 是旋轉中性物質的角速度的平方。

【0094】 在電子發射的表面（例如，約束壁的內表面）旁邊的薄區域中，自由電子產生一個強電場（參見圖2a-b中相鄰約束壁210的電子富集區232的原理圖）。高濃度的中性粒子限制了電子的平均自由路徑，從而阻止它們遵循彈道軌跡，從而獲得足夠的動能以更好的電離中性粒子。此外，由於中性粒子具有比離子更高的密度，所以可用於重組的正離子相對較少。例如，離子和中性粒子的比例在小於約1:10，小於約1:100，小於約1:1000或小於約1:100的範圍內。因此，中性粒子通常分佈於電子和正離子之間。這種條件在約束壁的內表面附近產生高濃度的過量電子，因而產生強電場。

【0095】 在非常薄的區域（例如，靠近電極的內表面）大量過量的電子（超過離子）以及高濃度的中性粒子組合產生非常強的電場。在這個地區，強場降低了相互作用的帶正電荷的原子核庫倫排斥。因此，兩個帶正電荷的原子核接近的概率顯著增加。

【0096】 另外，如上所述，旋轉粒子撞擊約束壁的內表面使得相互作用的聚變反應物有重複機會達到聚變反應。中性粒子反復穿過電子富集層並撞擊約束壁或護罩的內表面並重新進入反應器的內部空間。在壁上的這種衝擊是在受限制環境（例如，約束壁的內表面）中旋轉顆粒產生的離心力的徑向分量。重複的碰撞，接觸或撞擊增加了在給定時間段內給定區域中聚變反應的可能性。這種重複取代了長約束時間的需要，並解決了傳統方法中要實現聚變反應就要達到勞森判據的種種困難。簡單來說，聚變反應的總概率顯著增加。

【0097】 作為示例，富電子區域可以通過以下參數值的任意組合來表徵：

【0098】 自由電子密度：約 10^{23} /cm³

【0099】 中性粒子密度：約 10^{20} /cm³

【0100】 正離子密度：約 10^{15} - 10^{16} /cm³ (約是中性粒子的 10^{-5} to 0.01%)

【0101】 電子和正離子密度的差異：約 10^6 to 10^8 /cm³

【0102】 富自由電子區域（大多數電子密度梯度存在的區域）的厚度（徑向））：約1 μ m

【0103】 在富電子區域電場強度：約 10^6 to 10^8 V/m

【0104】 電子溫度：約1800-2000 K. (about 0.15 to 0.17 eV)

【0105】 向心加速度：約 10^9 g's (其中g是重力加速度= 9.8 ms^{-2})

【0106】 這種系統中的自由電子可以被視為共同催化兩個原子核的聚變反應。通過類比，一個或多個與質子和氘核相結合的 μ 介子有時被描述為催化氘和氘原子的聚變。正如 μ 介子通過使得兩個聚變核彼此更接近

的方式催化反應，聚變核附近的自由電子催化本文所述的聚變反應。有效地，電子減少阻擋兩個反應物足夠接近反應的能量障壁。這與化學或物理環境中任何催化劑的作用非常相似。 μ 介子和電子都增加反應速率，但實際並不參與反應；它們僅減少反應物之間的能量障壁使反應物足夠靠近從而發生反應。

【0107】然而， μ 介子和電子催化幾乎沒有其他相似之處。由於各種原因， μ 介子催化的聚變在商業上不可行。值得注意的是， μ 介子具有比電子更大的品質，因此製造 μ 介子更加昂貴。此外，只有相對較少的數量在任意時間產生，這意味著聚變的損益兩平要求是無法實現的。在質子-硼11反應中，實現損益兩平聚變要每立方釐米每秒大約 10^{17} 個成功的聚變相互作用發生。大型池中只有少數幾個原子核能從 μ 介子催化核聚變獲益，遠遠無法達到聚變所需的水準。

【0108】相比之下，電子可以容易地產生，且密度高。例如，根據本文公開的技術，可以以每立方釐米大約 10^{20} 或更大的密度產生電子。具有這樣高的密度，電子集體起作用以產生高電場，其在較大的體積上減小了互相接近的核之間的相互作用的庫侖障壁。這樣相當大的體積允許所需要的相互作用損益兩平，即每立方釐米每秒至少約 10^{17} 個成功的聚變相互作用發生。

術語

【0109】“反應器”是一種或多種反應物反應以產生一種或多種產物的裝置，通常伴隨著能量釋放。一個或多個反應物通過連續遞送，間歇遞送和/或一次遞送在反應器中提供。它們可以以氣體，液體或固體的形式提供。在一些設計中，提供反應物作為反應的組分；例如，其可以包括在

諸如壁的反應器的結構中。硼11，鋰6，碳12等可以設置在反應器的壁中。在一些設計中，反應物是由一個外部來源（例如從氣體供應罐）提供的。在某些實施方案中，反應器被配置為促進 $Q > 1$ 的核聚變反應。反應器可以具有用於去除反應期間產生的產物和/或能量的元件。產物去除元件可以是埠，通道，吸氣劑等。能量去除部件可以用於去除熱能的熱交換器等，以及用於直接去除電能的電感器和類似結構等。反應器元件可以允許產物和能量被連續或間歇地移除。在某些實施方案中，反應器具有包含反應物的一個或多個約束壁，並且在一些設計中提供反應物的源，電場等。如本公開所示，適用於提供持續聚變反應的反應器可有許多不同的設計。

【0110】 “轉子”是反應器或反應器元件，其中一個或多個反應物或產物（粒子）在其空間中旋轉的。該“空間”可以（或）由本文所述的約束壁限定。在一些設計中，旋轉是由磁力，電力和/或兩者的組合引起的，如勞倫絲力的情況。在某些實施例中，通過以使得它們在約束區域中旋轉的方式對帶電粒子施加電和/或磁力來誘導旋轉；旋轉的帶電粒子與中性粒子碰撞，使中性粒子在約束區域中同樣旋轉，這種現象有時稱為離子 - 分子耦合。由於中性粒子不受電和/或磁力的影響，它們在沒有與帶電粒子產生交互作用的設計中不會在約束區域內旋轉。轉子的約束壁或其它外部結構可以具有如本文所述的許多封閉形狀。在一些實施例中，外部結構是大體上圓形或圓柱形的形狀。在這種設計中，形狀不需要在幾何上精確，而是可以表現出一定的變化，例如圍繞旋轉軸線的偏心率以及非連續曲率（例如頂點）等。

【0111】 在一些設計中，轉子的約束區域具有相對於約束壁同心佈

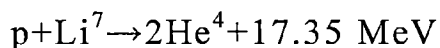
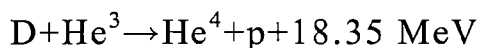
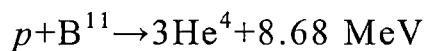
置的內部杆或其他結構。在這種設計中，轉子具有供粒子旋轉的“環形空間”。當在本文中使用时，“環形空間”是指約束區域，其中該區域基本上是環形的。應當理解，一些轉子不具有內部杆或其它結構以限定環形空間。在這種設計中，轉子的約束區域僅僅是中空結構。雖然環形空間多數是大致圓柱形的形狀，但是這樣的形狀可以表現出一定的變化，例如圍繞旋轉軸線的偏心率以及非連續曲率（例如頂點）等。

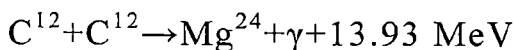
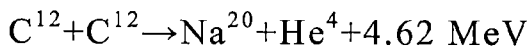
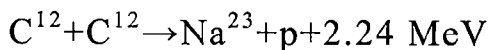
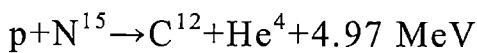
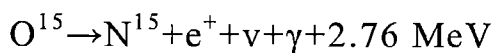
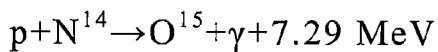
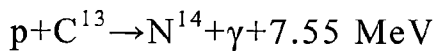
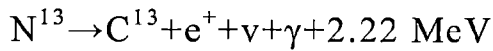
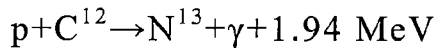
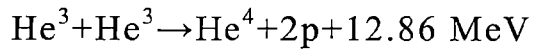
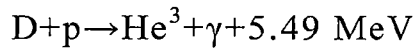
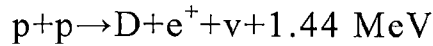
【0112】 由於所產生的電磁場，“勞倫絲力”由電力和磁力的組合施加於一個電荷上。力的大小和方向由電場和磁場的交叉乘積給出；因此力有時被稱為 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 。當電場和磁場具有正交方向時，施加到帶電粒子的力具有可以由右手定則表示的旋轉方向。

【0113】 在聚變反應中，參與的反應物和產物--可能包括質子， α 粒子和硼（ ^{11}B ）--不一定以百分之百的純度存在。在本文中給出任何這樣的反應物，產物或反應的其他組分中，這樣的組分被理解為很大程度上存在。換句話說，組分不需要以100%的水準存在，而可以以較低水準存在，例如品質約95%或約99%。

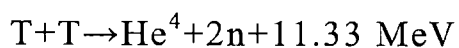
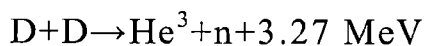
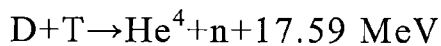
【0114】 非中子聚變反應通常的定義是其中中子攜帶不超過總釋放能量的1%的能量的聚變反應。如本文所用，非中子反應或基本非中子反應是符合該判據的反應。

非中子反應的實例包括：





中子反應的實例包括：



【0115】 庫倫排斥力是相同電荷的兩個或更多個粒子之間的靜電力。對於兩個相互作用的粒子，它與間隔距離的平方的倒數成正比（庫倫定律）。因此，當帶電粒子彼此接近時，斥力明顯增強。由多個帶電粒子產生的電場中，一個帶電粒子的排斥力是附近所有帶電粒子疊加的作用。

【0116】 降低庫倫障壁意味著當粒子接近足夠數量的電子或其他帶電粒子時，通常已知和理解的兩個獨立的粒子之間所計算或所受到的庫倫排斥力被“降低”或減少一定可計算的程度，以減少獨立的粒子會受到的排

斥力。例如，以XX的密度存在過量的電子減少域中兩個帶正電荷YY粒子之間的ZZ%的庫倫排斥力。

勞倫絲轉子實施例

第一實施例

【0117】圖1a-c示出了反應器的第一個實施例，其中帶電粒子、帶電物質或離子由於勞倫絲力而旋轉。圖1a是反應器的橫截面視圖，而圖1b提供了沿著圖1a的A-A介面的同一反應器的等距剖視圖，除非另有說明，否則使用r， Θ 和z方向座標的圓柱坐標系，如圖1b所示。在所描述的實施例中，勞倫絲驅動的轉子有作為外部電極的外壁110，有時稱為放電杆的同心內部電極120，其通過環形空間140與外部電極分離。通過在內部電極120和護罩140之間施加電勢，跨越環形區域形成電場。當在電極之間施加足夠的電勢時，環形空間中的氣體被部分電離，產生跨越環形區域的徑向等離子體電流。在各種實施例中，當護罩接地時，內部電極保持在高正電勢，使得電場和電流流動基本上處於正r方向。

【0118】圖1c描述了勞倫絲力如何在約束壁110內方位角的方向驅動帶電粒子。在圖1c中，放電杆已經被移除，並將軸在z方向上平移以提高清晰度。雖然未示出，但是使用諸如永磁體或超導磁體等磁體來產生基本上平行於環形區域內的z軸（基本軸向）的磁場。磁場基本上垂直於電流的方向，導致移動的帶電粒子、帶電物質和離子在方位角（或 Θ ）方向上受到勞倫絲力。例如，放電杆有相對外部電極具有正電勢（如放電杆有施加的正電勢且外部電極接地），因此在r方向（144）產生電場。在該配置中，帶正電荷的離子將在r方向上通過環形區域140向外部電極移動。如果磁場同時指向z方向（146），離子將會在 $-\Theta$ 方向受到洛倫茲力，或圖

1b和**1c**所示的角度看，則是順時針方向。在一些設計中，電場和磁場可以處於與垂直方向不同但又不是平行的角度，使得垂直分量以更小或更大的程度存在，具有足夠的強度以產生足夠強的方位角的勞倫絲力。這種方位角的力作用於帶電粒子、帶電物質和離子，這些帶電粒、帶電物質和離子又與中性粒子結合，使得中心放電杆和外部電極之間的環形空間中的中性粒子以高旋轉速度移動。無任何移動的機械部件意味著對於旋轉速度幾乎沒有限制，從而提供超過例如100,000RPS的中性粒子和帶電粒子的旋轉速率。

反向電極性實施例

【0119】 圖**5a-d**描繪了另一個實施方案，其中反應器可利用勞倫絲力通過離子 - 中性粒子耦合驅動離子和中性粒子旋轉。反向電極性的反應器與圖**1a-c**中所示的反應器的不同之處在於，電場和電流（按照慣例在正電荷移動的方向上）基本在負 r 方向上。圖**5a**是反應器的橫截面視圖，圖**5b**提供了相同反應器沿著圖**5a**的截面A-A的等距剖視圖。反向電極性轉子具有外部電極**510**和同心內部電極**520**，內部電極**520**與外部電極由環形區域**540**分開，環形區域**540**在本文中稱為約束區域。通過向內部電極和/或外部電極施加電勢，可以在環形空間中形成指向內部電極的徑向電場。當在電極之間施加足夠的電勢時，環形空間中的一部分氣體被電離，並且產生穿過環形空間的徑向等離子體流。

【0120】 圖**5c**描繪了勞倫絲力如何用於在反應器內沿方位角驅動帶電粒子。在圖**5c**中，內部電極已從視圖中移除，並且所描繪的軸已在 z 方向上被平移以提高清晰度。儘管未示出，但是諸如永磁體或超導磁體的磁體用於產生施加的磁場，該磁場在環形空間內基本上平行於 z 軸（即基本

在軸向方向)。磁場基本上垂直於電流的方向，導致帶電粒子、帶電物質和離子在方位角（或 Θ ）方向上受到勞倫絲力。例如，在內部電極具有施加的負電勢而外部電極接地（或保持在正電勢）的情況，在負的 r 方向（**544**）上產生電場。在該配置中，帶正電的離子將通過環形區域**540**在負 r 方向上向內部電極移動。如果磁場同時指向 z 方向（**546**），離子將在 $+\Theta$ 方向或從圖**5b**和**5c**所示的角度來看的逆時針方向上經歷勞倫絲力。在一些設計中，電場和磁場可以處於與垂線不同但不平行的角度，使得垂直分量以更小或更大的程度存在，具有足夠的強度，以產生足夠大的方位角的勞倫絲力。該方位角的力作用於帶電粒子、帶電物質和離子，其又與中性粒子耦合，使得環形空間中的中性粒子也高速運動。沒有任何移動的機械部件意味著對可以發生旋轉的速度幾乎沒有限制，因此中性粒子和帶電粒子的旋轉速率可以超過如100,000RPS的速率。

反向場實施例

【0121】 圖**6a-d**描繪了另一反應器實施方案的多個視圖，其利用勞倫絲力通過離子 - 中性粒子耦合驅動離子和中性粒子旋轉。該實施方案的反應器使用反向場配置操作。具有這種配置的反應器與圖**1a-c**和圖**5a-d**中所示的反應器的不同之處在於，約束區域內的電場和磁場方向都是相反的。在這種配置中，磁場不是平行於 z 軸，而是沿正或負 r 方向徑向指向。類似地，電場不是徑向指向而是基本上平行於 z 軸。圖**6a**是反應器的等距視圖，圖**6b**是反應器在 z 方向上的視圖，圖**6c**是反應器的等軸截面圖（對應於圖**6b**中的線AA），圖**6d**是反應器的側視圖。所描繪的實施例包括內環磁體**626**和同時也用作約束壁的同心中環磁體**616**。環形磁體的磁極沿相同方向，使得內圈和外圈磁鐵的對應表面相同。在這種設計中，外表面

是北極**658**，並且內表面是南極**659**。在一些實施例中，在磁體**658**的內表面上可以存在一個或多個附加材料層，使得約束表面材料與磁性材料不同。同心磁體之間的區域形成環形空間**640**，環形空間**640**通過約束區域**660a**的一端上的電極和約束區域**660b**的另一端上的電極被束縛在 z 方向上。通常，約束區域的任一側上的所有電極（對應於電極**660a**或電極**660b**）被賦予類似的電勢。與所述混合反應器不同，電極**660a**（或電極**660b**）可以是單個連續電極，例如形成環形或盤形。如果電極**660a**接地並且環形空間**660b**的另一側上的電極被給予正電勢，則在正 z 方向上在約束區域內施加電場。如果磁場指向 r 方向（如所描述的那樣），則正交電場和磁場使得離子在 θ 方向上沿方位角旋轉（參見例如圖**6c**）。或者，如果電極**660b**接地，電極**660a**被施加正電勢，電場方向為負 z 方向，則離子將在 $-\theta$ 方向上旋轉。

波-粒子實施例

【0122】圖**7a**和**7b**中示出了受控聚變設備的第二實施例，其中離子由於靜電場的振盪而旋轉。在該實施例中，通過位於外環上或形成外環的多個分立的電極**714**產生的電場加速離子在方位角方向轉動，或者與位於內環上或形成內環的內部電極**724**組合以在環形空間**740**內產生局部的、在方位角變化的電場。在一些設計中，壁電極共同形成約束壁，在另一些設計中，壁電極可以設置在一部分約束壁或支架上或當中。電場以控制序列振盪，使得施加到離子的靜電力在大致方位方向（在 Θ 或 $-\Theta$ 方向）上順序地進行。以這種方式，帶電物質的加速類似於沿火車軌道的振盪磁場推動的磁懸浮列車。可以向電極施加振盪電勢。振盪可以在相鄰電極間的相位或其他參數上變化，從而引起或保持離子的旋轉運動。

【0123】 存在於環形空間中的離子由於電場而受到靜電力，並且通過離子--中性粒子耦合的原理，相對較小數量或百分比的離子就足以來驅動大量較大數量或百分比的中性粒子。離子驅動中性子旋轉可以通過任何合適的機制產生，例如電感或電容耦合。在一些實施例中，當將RF電荷序列施加到壁和/或內部電極時，產生離子。在一些實施例中，壁和/或內部電極可以首先經歷電荷序列以使環狀空間中的一些中性氣體電離，然後轉變成驅動離子旋轉的電荷序列。例如，將壁電極714接地，同時向內部電極724施加高電位，可以產生電離氣體的電荷分佈。在一些實施例中，已經部分電離的氣體可以被引入到環形區域740中。

【0124】 雖然圖7a和7b描繪了可用於驅動環形區域中的離子旋轉的兩個二進位電荷分佈，還有許多電荷序列也是可能的。在一些電荷序列中，電極可以在一段持續時間內保持在接地電位，或者可以有不對稱的電荷序列（例如，正電勢被保持的時間為負電勢持續時間的兩倍）。

【0125】 在某些實施方案中，該系統不需要磁場，例如軸向靜磁場。圖7a描繪了本實施例在第一個時間點的示例，在該時刻電極被提供第一電勢分佈，使得離子（如離子雲或離子團）704在 $-\Theta$ 方向上受力。圖7b描繪了圖7a的實施例中稍後的時間點的情況，在該時刻電極被提供不同的電勢分佈使離子704繼續在 $-\Theta$ 方向上受到方位角力。

混合實施例

【0126】 在某些實施方案中，反應器可以產生勞倫絲力和振盪靜電場，以通過離子 - 中性耦合驅動離子和中性粒子旋轉。在任何操作階段，反應器可以使用這些機制中的一個或兩個。圖6a-f描繪了適於這樣操作的示例性反應器。圖6a是Z方向的反應器的等距視圖，圖6b是Z方向的反應

器的視圖，圖6c是反應器的等軸截面圖（對應於圖6b中的線A-A），圖6d提供了反應器的側視圖，以及圖6e和6f是在不同時間點的截面圖（對應於圖6d中的線B-B）。所描述的實施例包括用作約束壁的內環磁體626和同樣用作約束壁的同軸外環磁體616。環形磁體的極定向在相同方向上，使得內環和外環磁體的相應表面相同。在這種設計中，外表面為北極658，內表面為南極659。在一些實施例中，在磁體658的內表面上可以存在一個或多個附加的材料層，使得約束表面材料不同於磁性材料。同心磁體之間的區域形成的環形空間640，其通過一對或多對電極660a和660b被束縛在z方向上。當電極對660a和660b被賦予不同的電勢時，例如電極660b接地，電極660a被施加正電勢，在環形空間中產生基本上平行於z方向的電場。當在環形區域中產生離子時，正交電場和磁場使它們在 $-\Theta$ 方向上角向旋轉（參見例如圖6c）。如果在電極660a接地的同時對電極660b施加正電位，則離子將沿 Θ 方向旋轉。

【0127】 在一些實施例中，如圖6a-e所示，多個電極660a和660b沿著環空間徑向分佈。在這種設計中，以與圖7a和7b中的反應器的驅動方式相類似的方式驅動反應器。在操作期間，每個電極對被以與相鄰電極對的電勢不同的類似的電勢驅動，使得在 Θ 方向上產生局部電場。如圖6d和6e所示，施加到電極對上的電壓可以受控順序被調製，使得施加到離子的靜電力呈現基本連續的方位角（在 Θ 或 $-\Theta$ 方向）上的變化分量。在一些配置中，反應器可以設置為最初通過勞倫絲力驅動離子和中性粒子的方式操作，然後使用上述交變靜電場驅動離子和中性粒子。

【0128】

反應器類型（尺寸）

【0129】 在一個方面，反應器可以按它們提供的輸出功率分類。以這種方式，出於本討論的目的，本公開的反應器分為小型，中型和大型反應器。小規模反應器通常能夠產生約1-10kW的功率。在一些實施例中，這些反應器用於個人應用，例如為汽車供電或向家庭提供動力。下一個分類是中等規模的反應器，其通常提供約10kW-50MW的功率。中型反應器可用于較大的應用，如伺服器群，大型車輛，如火車和潛艇。大規模反應器為輸出約50MW-10GW功率的反應器，並且可用於大型操作，諸如為電網和/或工業發電廠的部分供電。雖然這三個分類提供了本公開可能涉及的實際類別，但是本文公開的反應器不限於這些類別中的任何一個。

【0130】 護罩或約束壁的表面積（周長和軸向的乘積）通常限制了反應器可產生的最大功率。具有大表面積的護罩在內表面的大面積上（例如，圖1a中的122）發生聚變反應。對於小型反應器，護罩的內表面的半徑通常為約1釐米至約2米，並且內表面的表面積通常在約5立方釐米至20立方釐米之間。對於中型反應器，護罩的內表面的半徑通常為約2米至約10米，並且內表面的表面積通常在約25 立方米和150立方米和之間。對於大型反應器，護罩內表面的半徑通常為約10米至約50米，並且內表面的表面積通常在約125立方米和628立方米之間。在某些設計中，內表面的半徑可能在幾公里左右，具有與瑞士的CERN實驗室運行的大型強子對撞機（LHC）類似的占地面積。上述每個值都假定單個反應器是獨立的，或者是連續排列的反應器的一部分（如下所述）。

第一實施例

【0131】 圖1a-c示出了具有同心電極的反應器的結構，其利用勞倫絲轉子來驅動帶電粒子和聚變反應物旋轉。該實施例有內部電極120，外

部電極**110**和兩個電極之間的環形空間**140**。在操作期間，這些電極之間的施加電勢產生在 r 方向上的電場**144**。雖然未示出，但是該實施例還包括在內外部電極之間的 z 方向上產生磁場**146**的永磁體或電磁體（例如，超導磁體）。如圖**1c**所示，由於徑向電場和軸向磁場，在電極之間移動的帶電粒子經歷方位角方向的力或勞倫絲力。

【0132】如圖所示，圖**1a**所示的反應器具有間隙**142**，其使內部電極**112**的外表面和外部電極**122**的內表面徑向分開。雖然內部電極和外部電極的相對表面的表面積可以決定反應器的大小，在較大的應用範圍內徑向間隙可保持相對恒定。在一些設計中，間隙的上限限於中可用於電離環形空間的氣體並產生等離子體電流的功率，而間隙的下限可限於製造公差。當間隙非常小時，例如小於0.1毫米時，電極之間的任何未對準可能導致電極接觸而產生短路。當然，由於製造公差中可以有更高的精度，較小的間隙可能是可行的。在一些實施例中，間隙可以在約1毫米和約50釐米之間；在一些實施例中，間隙可以在約5釐米和約20釐米之間。在一些設計中，間隙可以沿反應器的 r 方向和/或 z 方向變化。例如，內部電極的半徑可以作為沿著 z 軸的位置的函數而變化，而外部電極的內表面的半徑是恒定的。

【0133】由外部電極產生的約束壁在 z 方向上的長度由反應器的徑向尺寸和發電要求確定。在一些實施例中，外部電極在 z 方向上的長度可能受到用於產生磁場的磁體的類型和構造的限制。例如，如果將永磁體沿著 z 方向放置在環形空間的任一端（如圖**11**所示），則外部電極 z 方向上可能被限制在約5或約10釐米。然而，如果使用多個永磁環磁體或電磁體或超導磁體（如圖**10**所示）產生磁場（如圖**16**和**17**所示）那麼外部電極在 z

方向可能會更長。例如，外部電極可以在約1米到約10米之間。通常，外部電極**110**的長度與內部電極**120**的長度類似，但並不總是這樣。在一些實施例中，內部電極可以在一側或兩側延伸超出外部電極。在一些實施例中，外部電極的長度可以超過內部電極的長度，使得外部電極在一側或兩側延伸超出內部電極。

【0134】 圖**1a-1b**描繪了其中一種配置，固體圓形內部電極與圓形外部電極結合使用，在該配置中還可以使用其他電極形狀的組合。替代實施例的幾個非限制性示例對於本領域技術人員是顯而易見的，參考圖**8a-b**和**9a-c**進行討論。在此提供幾個說明性示例，讀者可以容易地理解其他電極形狀是可行的。

【0135】 如圖**8a**所示，在一些實施例中，內部電極**820**可以是不連續的環狀結構。內部電極的空腔或開放空間，使用如圖**17a-c**所示的內部磁體，或者使用反應器內的其它部件，都有利於反應裝置的散熱。在一些設計中，內部電極和外部電極的半徑可以沿反應器的 z 方向變化。例如，如圖**8a**所示，內部電極**820**可以沿著 z 方向在某些位置處具有較大的圓周，從而在這些位置減小間隙**842**。相反，可以使用均勻的內部電極和內部半徑沿 z 方向改變甚至波動的外部電極。在某些設計中，如圖**8b**所示的實施例，內部電極**820**的半徑和外部電極**810**的內表面的半徑都在 z 方向上變化，使得間隙**842**沿著反應器的 z 方向保持不變。

【0136】 圖**9a-c**描繪了具有非圓形橫截面的反應器的橫截面。如圖所示，在一些實施例中，內部電極**920**和外部電極**910**可以具有在方位角，即在 Θ 方向上變化的半徑。在某些設計中，內外部電極的表面（**912**和**922**）可具有如圖**9a**所示的橢圓截面。在一些設計中，橢圓形橫截面電

極的長軸和短軸只相差很小，例如小於1%。在一些實施例中，表面**912**和/或**922**可以形成多邊形橫截面，例如圖**9b**所示的反應器，有七邊形的橫截面。在一些實施例中，表面**912**和**922**可以具有4個或更多個邊；在一些實施例中多於8個邊，在一些實施例中多於16個邊。在某些設計中，表面**912**上的角可能是有利的；例如，旋轉粒子可能與拐角位置處的靶材料的碰撞速率增加，導致聚變比率增加。在一些實施例中，如圖**9c**所示的反應器配置中，由表面**912**和**922**限定的內部或外部電極的半徑可以在 Θ 方向上變化，使得任一表面的橫截面是特定邊緣；例如是正弦，鋸齒形或方波形的邊緣。所描述的實施例中的內部電極和外部電極是同軸的，但在一些實施例中，內部電極和外部電極的軸線是偏移的，例如，環形區域是偏心的，使得內部電極和外部電極具有基本平行但不共線的z方向軸。

【0137】 用於內部和外部電極的材料取決於反應器尺寸，選定的聚變反應物以及控制聚變反應器操作的其它參數。通常，在成本、熱性能和電氣性質方面存在許多權衡，其決定哪些材料可被選擇以用於反應器。由於耐火金屬（例如，鎢和鈹）高熔點和高溫下的相對高的導電性，小型反應器可以選擇耐火金屬。然而在大規模反應器中使用這些材料可能會顯著增加反應裝置的成本。

【0138】 在某些實施方案中，電極材料具有足夠高的熔點以承受反應器操作期間釋放的熱能。對於外部電極，組成可能發生聚變反應的約束壁，釋放的熱能通常很大。為了經常使用，外部電極的材料的熔點應超過反應器操作期間由電極達到的溫度。在某些設計中，選擇用於電極的材料熔點大於約800°C，在某些設計中，熔點大於約150°C，而在其它設計中，熔點大於約2000°C。

【0139】 在許多實施例中，電極材料具有高導熱性是有益的。如果可以在穩定狀態條件下以等效的速率從電極（例如，使用熱交換器）中提取傳遞到電極的熱量，則反應器可適用於連續操作。當電極材料具有高導熱性時，可以提高提取熱量的速率，並且減少對於材料過熱的擔憂。在一些設計中，熱導率大於約 $10 \frac{W}{m^{\circ}K}$ ，在一些設計中，熱導率大於約 $100 \frac{W}{m^{\circ}K}$ ，在另一些設計中，熱導率大於約 $200 \frac{W}{m^{\circ}K}$ 。

【0140】 在某些設計中，例如當反應器配置為脈衝操作時，電極材料具有高的熱容量可能是有益的。通過具有高的熱容量，在反應器的操作期間，電極升溫速率較慢。當用於脈衝操作時，所產生的熱能可以在脈衝之間繼續通過電極消散，從而防止電極達到其熔點。在一些設計中，電極的比熱應高於約 $0.25 J / g / ^{\circ}C$ ，在某些設計中，比熱應大於約 $0.37 J / g / ^{\circ}C$ ，在其他設計中，比熱應高於約 $0.45 J / g / ^{\circ}C$ 。

【0141】 在某些實施例中，電極材料具有相對較小的熱膨脹係數。在一些設計中，通過具有低熱膨脹係數，反應器可以在更大的溫度範圍內運行良好。例如，如果反應器在室溫下具有約1毫米的間隙，則由於內部和/或外部電極的膨脹，在穩定狀態操作期間，間隙會相應小得多。如果熱膨脹係數太高，外部電極和內部電極可能接觸從而導致短路。或者，如果將反應器設計成在工作溫度下具有一定的間隙，則當反應器首次運行時，間隙可大於所需的間隙。在一些設計中，電極材料的線性熱膨脹係數小於約 $4.3 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$ ，在某些設計中，電極材料的線性熱膨脹係數小於約 $6.5 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$ ，在其他設計中，電極材料的線性熱膨脹係數小於約 $17.3 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$ 。

【0142】 為了便於反應器操作，可以將電極設計成具有諸如在熱迴

圈期間抗變形性的機械性能。在某些條件下，一些材料，例如不銹鋼變脆，最終由於熱迴圈而經歷金屬疲勞。如果反應器在脈衝操作中運行並且電極被快速加熱和冷卻，則可能產生內部應力。在一些設計中，可以通過使用具有單個體材料的電極，或通過使用具有相似膨脹係數的兩種或更多種材料來降低熱負荷迴圈的影響。某些材料可能由於高溫下而變形。因此，可以選擇在升高的溫度下保持強度的電極材料。

【0143】電極材料可能是化學惰性的，並且在反應器的使用壽命期間不會受到氧化，腐蝕或其它化學降解的影響。電極材料的另一個考慮是它們是否是鐵磁性的。在某些設計中，如果使用鐵磁材料則產生內部局部磁場，其對環形空間內預設磁場的建立或維護產生干擾。

【0144】在具有同心電極的勞倫絲驅動反應器中，內部電極和外部電極可由導電的材料製成，使得在操作期間，電勢均勻地施加在電極的表面上。在某些實施方案中，在室溫下，內部或外部電極材料的電阻率小於約 $7 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ，在一些設計中小於約 $1.68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 。除了在室溫下導電之外，當反應器不工作時，內部電極和外部電極在較高溫度下也是導電的。在操作期間，內部電極或外部電極可達到約 600°C 至約 2000°C 的溫度。在操作期間，外部電極材料的電阻率應不大於約 $1.7\text{E}-8\Omega\text{m}$ ，在一些設計中不大於約 $1\text{E}-6\Omega\text{m}$ 。

【0145】在反應物或副產物包括氫或氦的設計中，可以考慮材料對氫脆性的抵抗力。氫脆性是如不銹鋼等金屬變脆的一些過程，在某些設計中是由於氫原子或分子引入並隨後擴散到金屬中而導致斷裂。由於在較高溫度下氫的溶解度增加，因此在反應器運行期間，氫氣擴散到電極材料可能會增加。當通過濃度梯度輔助時，其中金屬外部的氫遠多於內部，例如

(Inconel)、蒙乃爾銅-鎳合金 (Monel)、哈斯特洛伊耐蝕鎳基合金 (Hastelloys) 和鎳鉻鈦合金 (Nimonic)。在一些設計中，電極至少部分地由銅或銅合金製成。在一些設計中，電極配置有一個或多個通道用於內部冷卻以提取熱量，可以使用耐極端溫度程度較低的材料。

【0148】雖然在某些操作條件下，小的原子聚變反應物例如氫，氘或氚的吸收可導致電極的機械故障，但某些材料可能會減少或消除有害的脆化作用。例如，在某些條件下，諸如鈦 - 銀合金的吸氫材料似乎不會受氫脆性的影響 (Jimenez, Gilberto, et al. "A comparative assessment of hydrogen embrittlement: palladium and palladium-silver (25 weight% silver, 通過引用將其整體併入本文)。在這種設計中，聚變反應物的吸收可能增加聚變反應的速率，例如，諸如氫的旋轉氣體反應物可能與固定在外部電極 (或約束壁) 上的固定氫原子碰撞。在一些設計中，通過使反應物通過內部和/或外部電極擴散而將反應物提供給反應器。在一些設計中，電極可以包括鈦、鈮或鈮合金，用於遞送聚變反應物或增加聚變反應物之間的碰撞速率。

【0149】在一些設計中，如本文別處所討論的，外部電極或內部電極可以包括具有高電子發射率的電子發射材料。在一些設計中，外部電極可以含有聚變反應物的靶材料。在某些設計中，由於聚變反應，靶材料在操作期間被消耗。例如，在某些設計中，六硼化鏷用作靶材料和硼-11原子在質子-硼反應期間被消耗。

【0150】第一實施例 - 電極在一些實施例中，外部電極是整體的，其是由單一材料製成的，在其它實施例中，外部電極具有包括兩種或更多種材料的層狀或分段結構。在一些實施例中，外部電極的內表面--約束

壁，包括靶材料（含有聚變反應物的材料）或電子發射材料。在一些設計中，靶材料或電子發射器可以覆蓋約束壁的整個表面區域，在另一些設計中，靶材料或電子發射器位於約束壁上一個或多個分立的位置（例如，如圖 21a-b所示的電子發射器）。

【0151】 在一些設計中，外部電極的內層提供一種性質，而更外層提供不同的性質。例如，形成約束壁表面的內層可以具有高熔點，而外層可有良好的導熱性或導電性。

【0152】 在一些設計中，電極可以包括形成約束壁的材料層，其比電極的其餘部分具有更高的耐氫脆性。在一些設計中，電極有一層陶瓷塗層，其可以防止氫原子穿透到外部電極的晶格中或提供體電極材料的熱絕緣。例如，外部電極可以具有氮化鋁層，氧化鋁層或氮化硼層。一些材料具有低導電性的材料（例如氮化硼）可以經加熱處理，以改善導電性。在一些設計中，電極可以經歷將某種材料添加到電極表面的表面處理，減少氫脆化。例如，當由易氫脆化材料（例如鈮）製成電極時，通過向電極表面添加少量的貴金屬來減少脆化。在一些設計中，貴金屬可僅覆蓋電極表面的一小部分。例如，貴金屬可以覆蓋小於電極表面的約50%，小於30%或小於10%，從而顯著減少電極氫脆化。在一些設計中，可以向電極表面添加少量的鉑，鈮，金，銱，銻，銻，鐵，銻和鈮以減少氫脆。在一些設計中，可以將貴金屬的點狀區（例如約0.5英尺半徑）鉚接或焊接到電極表面。在另一些設計中，可以在電極的表面上添加貴金屬粉末，正常運行中，粉末會散開到電極表面。在一些設計中，如在反應器已經運行預定時間後，可以週期性的將貴金屬添加到電極表面。

【0153】 在一些設計中，套筒附接到外部電極的內表面，使得套筒

的內表面形成約束壁。在一些設計中，可以使用套筒來例如提供靶材料，提供電子發射器，為防止氫氣穿透到外部電極提供屏障，和/或為外部電極提供熱保護。在某些設計中，套筒是可消耗的和/或可更換的。例如，如果套筒包含被消耗的靶材料，則套筒最終會被替換。在其他設計中，套管用作保護外部電極免受氫脆化的消耗層。在套管本身由於氫脆化而失效的情形中，替換成本比整個外部電極低得多。

【0154】 在一些實施方案中，外部電極可具有多孔或網狀結構，其允許高能帶電粒子穿過電極，同時仍將旋轉中性粒子限制在環形空間內。穿過外部電極的帶電粒子可以由外部磁體的磁場引導。在一些設計中，逃逸的 α 粒子被重定向到能夠將 α 粒子的動能轉換成電能的硬體（見本文其他地方的討論）。在一些設計中，電極中的孔徑可小於約100微米，在另一些設計中，小於約1微米。通常，內部電極的結構與外部電極的結構相似。與外部電極一樣，內部電極可以由單一材料製成，或者由兩種或更多種材料製成的層狀或分段結構構成。在一些實施例中，內部電極可以是固體；在其它實施例中，內部電極具有內部空間。在一些設計中，內部電極可以包括用於內部冷卻的一個或多個通路。在各種實施例中，內部電極連接到電源，該電源提供從內部電極輸出到接地的外部電極的電流。外部電極的材料通常也適用於內部電極，儘管在某些實施例中，內部電極不包括靶材料或電子發射材料。

第一實施例-磁體

【0155】 圖10a-d示出了第一實施例，其中軸向磁場由諸如超導磁體的電磁體施加。圖10a示出了圍繞反應器外部電極的超導磁體的等距視圖。如圖，磁體包括外殼1056。圖10b提供與圖10a相同的透視圖，移除

了超導磁體的外殼**1056**，露出超導線圈繞組**1054**。圖**10c**提供了沿著z軸觀察的反應器的透視圖，圖**10d**是對應於圖**10a**所示的截面線的等距截面視圖。如圖所示，反應器具有外部電極**1010**，內部電極**1020**，限定兩個電極之間的環形空間**1040**的間隙**10**。電流（如圖**10a**中的箭頭所示）通過包繞反應器的超導線圈繞組**1054**，產生通過環形空間在z方向上的磁場。在一些實施例中，超導磁體用於產生約1-20特斯拉、穿過環形區域的磁場。在某些設計中，所施加的磁場在1-5特斯拉之間。線圈置於反應器周圍的絕緣外殼**1056**中，該反應器保持在低溫（例如小於-180°C）和低壓。外殼**1056**可以通過例如絕熱膨脹氣體（例如He）或低溫液體來冷卻，使得超導線圈的溫度保持在其臨界溫度以下。在某些設計中，外殼可以機械冷卻，避免使用液態冷凍劑。線圈可以由諸如鈮鈦或鈮錫、鈹鋁鈣銅氧化物（BSCC）或鈹鋇銅氧化物（YBCO）等超導材料製成。線圈繞組可以以線型或者帶狀纏繞在絕緣材料中。在一些設計中，線圈繞組可以包括上述超導材料，放置在銅基中以提供機械穩定性。在一些實施例中，可以使用市場上的超導磁體，例如Cryomagnetics公司的供應商或者核磁共振成像設備的廠商。在某些設計中，可以使用例如或類似於用於Alpha磁譜儀實驗的AMS-02超導磁體的超導磁體。當使用超導磁體來提供軸向磁場時，約束壁的半徑通常小於超導磁體的半徑，例如在一些設計中半徑可以限制在約20米。

【0156】 當電磁鐵或超導磁體圍繞外部電極放置時，外部電極**1010**與磁體**1056**的外殼之間可能存在間隔。可以使用該間隔減少向磁體的熱傳遞。在一些設計中，熱交換器可以放置在外部電極**1010**和磁性外殼之間。當外部電極具有多孔或網狀結構時，在外部電極和磁體外殼之間可以

存在間隔，該間隔允許帶電粒子穿過外部電極。通過外部電極的帶電粒子，例如 α 粒子，可以通過離子迴旋運動在 r 方向上被約束，使得它們不與外殼**1156**碰撞。在一些設計中，外部電極之間の間隔約為3釐米至6釐米，在另一些設計中，約為6釐米至10釐米。如本文其他地方所述，帶電粒子可以在 z 方向上朝向能量轉換裝置行進，從而產生電能。圖**11a-b**示出了反應器，其中盤形永久磁體**1150**被放置在環形空間**1140**的任一端上以產生基本上軸向定向的施加磁場（圖中它指向 z 方向）。圖**11a**提供沿 z 方向觀察的透視圖，而圖**11b**提供了對應於圖**11a**中剖面線的等距截面視圖。如圖**11b**所示，反應器具有內部電極**1120**，形成約束壁**1112**的外部電極**1110**，以及內部和外部電極之間的環形空間。磁體**1150**放置在環形空間的任意一側，具有相同的磁性取向。例如，兩個磁體可以具有朝向正 z 方向的北極，或者兩個磁體可以具有朝向負 z 方向的北極。雖然未示出，但在一些實施例中，磁體**1150**可以是環形的，使得磁體接近環形空間**1140**，且沿著外部電極**1112**的內表面提供基本均勻的磁性區域。環形磁體具有與圖**11**所示的盤形磁體相同的極方向。

【0157】 圖**12a-b**示出了另一個實施例，其中在 z 方向上具有相同極性的多個永磁體**1250**（例如，與圖**11**中所示的盤形磁體相同的取向）置於環狀空間**1240**的任意一側，以產生沿著外部電極**1212**的內表面在 z 方向上的施加磁場。圖**12a**提供了在 z 方向上的透視圖，圖**12b**提供了對應於圖**12a**中指示的剖面線的等距截面視圖。一些特徵在放大視圖**1201**中被標記，其示出了內部電極**1220**，外部電極**1210**和永磁體**1250**限定形成的環形空間。在實施例中，使用多個較小的磁體降低可用於大型反應器中較大的單塊磁體相關的成本與物理限制。可以將圖**12a**和**12b**所示的磁體**1250**

的佈置可看做兩個面對面的環形磁體。雖然未示出，但是在一些實施例中，使用不同磁體形狀的組合來產生軸向磁場。例如，可以在環形空間的一側使用環形磁體，而另一側可以使用多個磁棒。

【0158】 圖13a-c示出了具有單個內部電極**1320**的反應器**1300**，沿著z方向排列的永磁體**1350**分離出多個環形空間**1340**。如圖所示，反應器具有內部電極**1320**、形成的約束壁**1312**的多個外部電極**1310**（其是壁片段的組合）和每個外部電極和內部電極之間的環形空間**1340**。圖13a提供沿z方向觀察的透視圖，圖13b和13c是分別對應圖13a中的指示的剖面線的截面圖和等距截面圖。當永磁體被放置在環形區域的任一端時，z方向上的環形空間的長度可能受永久磁體產生的磁場的強度的限制。在一些設計中，環形空間可以限制為例如約5或10釐米。通過在多個環狀空間**1340**之間沿Z方向排列磁體**1350**，可以增加外部電極**1310**和約束壁**1312**上的總表面積。與以前的實施例一樣，每個磁體**1350**具有沿著z軸的相同方向。這種設計有效地使用環形空間之間的永磁體，因為每個磁極幫助形成施加到邊界環形空間的磁場。儘管描繪的實施例使用環形磁體，但是也可以是許多其它形狀；例如，與環形空間接壤的每個磁體可以由許多較小的磁體組成，共同形成環狀結構（參見圖12a-b）。在一些實施例中，外部電極**1310**可以被分段成電隔離的物理上不同的部分。在一些實施例中，外部電極可以是單片的或以其他方式電連接的，例如使得對應於每個環形空間**1340**的每個外部電極接地。

【0159】 圖14a-c示出了其中單個反應器結構**1400**，沿著z方向排列的由永磁體**1450**分離的多個環形空間**1440**。如圖所示，反應器具有多個內部電極**1420**和多個外部電極**1410**，針對每組電極之間的環狀空間**1440**

形成約束壁**1412**。圖**14a**提供了z方向的透視圖，圖**14b**和**14c**提供了與圖**14a**中指示的剖面線對應的截面視圖和等距截面視圖。圖**14a-c**的實施例不是採用環形磁體和單個內部電極（如圖**13a-c**的實施例所示），採用盤形磁體和多個內部電極段。圖**13a-c**的對應特徵的描述涉及圖**14a-c**的實施例。在一些實施例中，所示的反應器可以僅使用可用環形空間的子集來操作，這取決於能量需求。例如，在一些實施例中，聚變反應物僅被引入到一個環形空間中，並且電壓電勢僅被施加到與該環形空間相鄰的內部電極。以這種方式，可以根據能量需求控制反應器的能量輸出，在必要時也能即時地進行監控。因此，在一些實施例中，各個內部電極**1420**和/或外部電極**1410**可獨立控制。

【0160】圖**15a-15c**示出了磁體**1550**基本上同軸且具有相同方向的一系列環產生的磁場。圖**15a**是三個磁體的等距視圖，圖**15b**是沿著磁體的共用軸線的視圖，圖**15c**是與圖**15b**中所示的標記對應的截面視圖。儘管先前的實施例利用了z方向上偏離環形空間的磁體，但是磁體也可以在r方向上徑向偏離環形空間。如圖**15c**中的虛線所示，當單獨考慮時，每個環形磁體產生一個起始於其北極並在其南極終止的磁場**1545**。當多個環形磁體彼此相鄰放置時，淨效應可以是組合的磁場---單個磁場的疊加並且基本上沿如圖中實心磁場線**1546**所示沿共用軸指向。該磁體構造在使用永磁體的同時延長反應器的環形空間的可行長度。

【0161】圖**16a-16c**示出了使用徑向偏移環磁體**1650**產生通過環形區域的軸向磁場的實施例。如圖所示，反應器具有單個內部電極**1620**和形成用於電極之間的環狀空間**1640**的約束壁**1612**的單個外部電極**1610**。圖**16a**提供沿著z方向觀察的反應器的透視圖，而圖**16b**和**16c**提供了對應

於圖16a中的指示的剖面線的截面圖和等距截面視圖。每個磁體1650沿z方向具有相同的極性。例如，如圖所示，每個磁體1650具有面向正z方向的南極。該實施例允許在z方向上延伸的環形空間，在約束壁1610上產生更大的表面積，並允許更大的功率輸出電勢。圖13和14的相應實施例的重疊特徵可以應用於圖16a-c的實施例。

【0162】 圖17a-17c示出了使用徑向偏移磁體（1750，1752）產生通過單個環形空間的軸向磁場。如圖所示，反應器具有單個內部電極1720和單個外部電極1710，該外部電極1710形成電極之間的單個環形區域1740的約束壁1712。圖17a提供了z方向上觀察的反應器的透視圖，而圖17b和17c提供了對應於圖17a中指示的剖面線的截面圖和等距截面視圖。圖17a-c的實施例超出了關於圖16a-c描述的實施例，其中附加磁體1752被放置在內部電極1620的內部區域中。如圖所示，附加磁體1752沿著z方向具有與外部磁體1750相同的取向。在一些實施例中，如圖17b和17c所示，內環磁體1752與z方向上的外環磁體1750對準。在一些實施例中，內環磁體可以偏離外環磁體，或者磁體之間的時間隔可能與外磁體的時間隔不同。在一些實施例中，內部磁體可以採用與外部磁體不同的形狀，例如。內部磁體可以是棒狀磁體。

【0163】 在一些實施例中，永磁體由稀土元素或稀土元素的合金製成。合適磁體的例子包括釷鈷磁體和釹磁鐵。現在或以後開發的其他強磁體也可能適合使用。在一些實施例中，可以使用永磁體來產生在環形空間中大約0.1和1.5特斯拉之間的磁場；在一些實施例中，永磁體可以在環形空間中產生約0.1和約0.5特斯拉之間的磁場。

【0164】 不是所有的反應器都需要永磁體。有些採用電磁體或超導

磁體，如參考圖10a-d所述。一些反應器採用永磁體和電磁體中的兩種或更多種的組合。圖18a-d示出了其中由電磁體施加軸向磁場的第一實施例。如圖所示，反應器有內部電極1820和在電極之間形成環狀空間1840的約束壁1812的外部電極1810。圖18a示出放置在反應器上的電磁體的等距視圖。圖18b是沿著z軸反應器的透視圖，而圖18c和18d描繪了與圖18b所示的截面線對應的截面視圖和等距截面視圖。電流通過在z方向上環繞反應器的線圈繞組1854，從而產生一個通過反應器的基本上在z方向施加磁場，如圖18c中的磁場線所示。通過導電線圈的電流可以由AC或DC電源提供。在由AC電源驅動導電線圈的設計中，內部電極和/或外部電極也可以由相同頻率的AC電源驅動。這樣做使得帶電粒子的旋轉保持在相同的方向，與另一種情況相反---如果磁場的交流極性與電場不同步會發生交替的方向。線圈可以由諸如銅，鋁，金或銀的導電材料製成。在一些實施例中，線圈採用纏繞在外部電極外部的的方式，在一些實施例中，線圈被放置在位於外部電極周圍的單獨的外殼中。

反向電極性實施例

【0165】前面已經在圖5a至5c中描述了反向電極轉子。通常，除非另有說明，否則第一個實施例的電極的結構也適用於反向電極性的設計方案。例如，用於內部和外部電極的材料、電極之間間隙（圖5a中的542）和用於在z方向上產生磁場的磁體的配置可以與同心電極反應器的設計相同。然而，如下所述，一些實施例採用不同的結構配置和/或不同材料（例如內部電極上的不同材料）。

【0166】圖5d描繪了反向電極轉子的交叉選擇。可以通過向內部電極施加負電壓且將外部電極接地，通過內部電極接地並向外部電極施加正

電位，或者通過向內部電極施加比外部電極更負的電勢，在負 r 方向施加電場。當向內部和/或外部電極施加電勢產生電場時，環形空間**540**中的帶正電的粒子被拉向內部電極**520**。當帶電粒子向內移動時，勞倫絲力使粒子在方位角上加速，從而可能導致螺旋軌跡，如路徑**503**所示。通過離子-電中性粒子耦合，環形空間中的電中性粒子與帶正電荷的粒子一起旋轉。由於內部電極和外部電極之間的電勢差，內部電極上的多的電子形成靠近電極表面的富電子區**532**，由於從而使這部分電子與受到勞倫絲力的正電粒子以相同的方向旋轉。如其他地方所述，這個富電子區可以減少聚變核之間的庫侖障壁。在一些設計中，該富電子區可以從內部電極的表面延伸出約100微米至約3毫米。

【0167】 在某些設計中，當帶正電的粒子向內移動時接觸內部電極時或當帶正電的粒子在富電子區中遇到自由電子時，發生帶電物質的複合。在一些設計中，帶正電的粒子會沿著拉莫爾（Larmor）半徑**502**環繞內部電極移動。在一些實施方案中，帶正電粒子的密度會在徑向方向上變化。例如，可以在Larmor半徑處圍繞環形空間的帶正電荷的粒子比在外部電極附近密度更大。帶電粒子的這種梯度可以導致環形區域內的速度分佈，其中外壁附近的粒子移動得更慢，此處由於離心力因此具有較高密度的中性粒子，並且較少的帶正電荷的粒子驅動中性粒子運動。

【0168】 在一些實施例中，內部電極由諸如鈮，鎢，銅，碳或六硼化鏷的單獨的材料構成。在一些設計中，內部電極具有塗覆有電子發射和/或靶材料**520b**的導電芯**520a**。例如，內部電極可以具有由導電和耐熱材料（例如鎢）製成的芯，其塗覆有六硼化鏷、氮化硼或另一種含硼材料。在一些設計中，內部電極的直徑在約1釐米至約3釐米之間，在另一些設計

中為約4釐米至約6釐米。在一些設計中，內部電極具有微小的橫截面，如可以是細絲或線。在這樣的實施例中，內部電極的直徑可以小於約0.5毫米，小於約0.1毫米或小於約0.05毫米。在一些設計中，內部電極在z方向上的長度約為3釐米至約10釐米。在一些設計中，內部電極可以在z方向上較小，例如小於約3釐米，或小於約1釐米。在一些實施例中，內部電極可以在z方向上更長，例如長於約20釐米。在一些設計中，用於反向電極性反應器的z方向的約束區域（內部和外部電極重疊的長度）可能受到向內部和/或外部電極施加電荷的電源的限制。在某些設計中，z方向上的長度可能取決於約束區域內的氣體壓力。在一些設計中，如果氣體壓力降低到非常低的值，則允許在z方向上增加長度，從而可能降低在環形空間內產生等離子體所需的功率。

【0169】 圖19a描繪了主動冷卻內部電極的幾種方法。在一些設計中，內部電極1910具有內部通路1928，流體可以通過該通道帶走熱量。例如，可以將水泵進內部通道以移除內部電極的熱量。在一些設計中，可以將內部電極接合到導熱、絕緣的陶瓷塊1923。陶瓷塊可以由諸如氧化鋁的材料製成。通過陶瓷塊散熱，從與其連接的內部電極的尾端移除熱量。在一些設計中，陶瓷塊會有開口活孔用以支撐內部電極。在一些設計中，使用固定螺釘將內部電極固定到陶瓷上。在一些設計中，通過陶瓷塊傳導的熱量用於產生電力，例如將熱電發電機或熱交換器連接到陶瓷塊的。

【0170】 在一些實施例中，如果目標材料被消耗或者電極損壞，則可以更換內部電極。例如，當硼塗層被消耗或者當細絲斷裂時，可以更換用作內部電極的塗有硼的燈絲。

【0171】 在某些實施例中，內部電極的長度超過環形區域（由外部電極的z方向邊緣決定）。在一些設計中，通過線性致動器，內部電極的位置在z方向上變化。例如，如果內部電極是導線，則在反應器的操作期間，可以將導線通過環形區域以防止內部電極熔化，或者在上面靶材料（例如，硼塗層）被消耗的設計中替換導線的一部分。

【0172】 在一些實施例中，內部電極的寬度會在z方向上變化。圖19b示出了內部電極1920延伸超過外部電極1910，並且通過可以用作內部電極的延展的套筒1921保持在適當位置。套筒1921可以由導電材料製成，例如銅、不銹鋼和鈇。在一些設計中，可以通過套筒向內部電極施加電壓；這可以減少對具有小直徑的內部電極的電阻加熱。在某些設計中，套筒的直徑可能遠大於內部電極的直徑。例如，套筒的直徑可以大於約10釐米，而內部電極的直徑小於約0.5毫米。在一些構造中，可以使用固定螺釘將內部電極固定到套筒上。在一些實施例中，套筒可以直接用螺紋連接到套筒中。這些和其它附屬裝置使內部電極1920可更換，而套筒1921是永久的。在一些設計中，套筒可以塗覆有諸如硼的靶材料。在一些設計中，如圖19a所述，套筒可以從內部冷卻。

【0173】 與第一實施例的反應器一樣，內電極和外電極之間間隙可能受到電源在約束區域內能夠產生的等離子體量的限制。在一些設計中，外電極可以在結構上類似於第一實施例中描述的外電極。在一些設計中，外電極可具有外部絕緣層。例如，如果在反應器的電極上施加交變信號，或者如果反向電極性反應器是需要彼此電隔離的多個反應器模組的一部分。通常，內電極和外電極的支撐結構可以含電絕緣材料，使電極與反應器的殼體絕緣，並防止電極之間的交流電流。在一些設計中，外電極是

金屬片（例如，銅片），放石英管內製成為圓柱形。在一些設計中，外電極是位於絕緣結構內的實心管狀結構。在另一個實施方案中，通過用金屬導電塗層塗覆石英管的內表面來製備電極。

【0174】 如其他地方所述，只需要少量的離子或帶正電的粒子來驅動大量電中性粒子旋轉。由於與外部電極相連的約束壁，電中性粒子的濃度在徑向方向上增加。同時，旋轉的電中性粒子不受徑向電場或軸向磁場的影響。由於與外壁和其他粒子的隨機碰撞，電中性粒子可能偏轉到電子密集區域，並在一些設計中，電中性粒子可能會撞擊內部電極上的靶材料，導致聚變發生。類似地，在一些設計中，帶正電的粒子也可能偏轉到產生聚變反應的內部電極中，發生質子 - 硼11聚合反應。

【0175】 在一些設計中，反電場極性反應器以恒定電壓模式運轉。例如，在內部電極和/或外部電極上施加電壓，從而在反應器運行期間維持電極之間恒定或基本恒定的電壓。在另一種操作模式中，反電場極性反應器以恒定電流模式運轉。當內部電極很小並且由於電阻加熱而容易發生故障時，以恒定電流工作是有利的。在某些設計中，最初使用恒定電壓模式控制反應器，然後轉變為恒定電流工作模式。

【0176】 在一些配置中，諸如電容器或電池的能量存儲裝置用於向內電極和/或外電極施加電勢以引發聚變反應。在一些設計中，電路調節能量存儲裝置提供的電流和/或電壓。在一些設計中，能量裝置（例如，電容器）連接到內電極和/或外電極並放電，直到能量存儲裝置不再能夠產生足夠強的電場來支持聚變反應。在一些設計中，反應器配置有額外的能量存儲裝置——在第一能量存儲裝置放電時由聚變反應產生的電能充電。在一些設計中，使用如電容器或電池的能量存儲裝置向內部電極和/

或外部電極施加電位以引發聚變反應。在某些設計中，由電路調節能量存儲裝置提供的電流和/或電壓。在一些設計中，能量裝置（例如，電容器）連接到內部電極和/或外部電極並且放電，直到此能量存儲裝置不再能產生足夠強、足以支持聚變反應發生的電場。然後，調節器調控能量存儲裝置的充電和放電模式轉換開關，從而可以保持聚變反應。

【0177】 在一些設計中，電源與內電極和/或外電極並不相連，並且在電極之間的電位差不足以維持反應前，聚變反應可以繼續發生一段時間（如，約10秒）。當電場變得太小而不能維持聚變反應時，可以重新連接電壓源或電流源，對內部電極施加負電位。

【0178】 在反向極性反應器運行之前，環形區域中的氣壓可為約1個大氣壓強或更高。在一些設計中，例如當內部電極在z方向上延長時，內部電極可能具有低氣壓以降低引發聚變反應所需的功率。在一些設計中，在操作反應器之前，環形區域內的氣壓可以減小到小於1托或小於10毫托。在一些設計中，環形區域內的氣壓可以通過入口和出口閥進行調節，以控制聚變反應發生的速率。

【0179】 對於反向電極性反應器，約束區域中的磁場有時大於約0.5特斯拉，有時大於約1特斯拉，有時大於約3特斯拉。在反向電場極性反應器的一些實施例中，基本上磁場不垂直於內電極和外電極之間的電場。在一些實施例中，磁場在約束區域上是不均勻的。可以通過調節磁體和/或電極的位置和方向來調節約束區域中的磁場。在一些設計中，不均勻的磁場可能增加離子和電中性物質與內部電極碰撞的速率。通常，施加的磁場和/或施加到電極的電位可以根據反應器的幾何形狀、反應物氣體構成和反應氣體壓力而變化。

【0180】 在操作過程中，由於離心力，在外壁附近粒子，特別是品質較高的粒子密度較大。這可能有助於從環形區域提取具有比旋轉反應物更高品質的聚變產物。例如，當聚變反應產生 α 粒子含有旋轉氦物質，可以集中 α 粒子於外壁附近，然後通過出口閥移除。在某些設計中，聚變產物可被泵送到另一反應器中，繼續用作反應物。例如，在反向電場極性反應器中產生的 α 粒子或氦原子可以被移動到另一個反應器，支援氦 - 氦聚變反應的發生。

反向場反應器實施例

【0181】 上文提到圖6a-d描述了另一個反應器實施例具有反向場配置。該配置採用勞倫絲轉體來驅動和保持粒子在環形空間中的旋轉運動。通常，可以施加反向場到本文所述的許多反應器中，同時磁場和電場的位置發生變換。

【0182】 可以使用諸如第一實施例所述的磁性材料製成的永磁體（616和626）來施加徑向方向上的磁場。在一些設計中，可以用具有徑向定向軸的多個方位角偏移的電磁體代替永磁體，例如基本上沿 r 方向定向的磁場施加在整個環形空間。在一些設計中，約束壁的表面可有一層或多層保護磁性材料。例如，鋁或鈿層可以為外部或內部磁體提供保護。在一些設計中，保護層可含有聚變反應物或電子發射體的靶材料。在某些設計中，約束壁可以具有內部冷卻系統，使材料保持低於其熔點並防止磁鐵退磁。

【0183】 在同心電極實施例中，內電極和外電極之間間隙有時受到環形空間中電離氣體的可用功率的約束。類似地，在反向場配置中，在 z 方向上的分隔電極660a和660b的約束區域也會受到限制。例如，在一些

設計中，電極之間間隔在約1毫米至約50釐米的範圍內，在另一些設計中，電極之間間隔在約5釐米至約20釐米的範圍內。

【0184】 在同心電極實施例中，環形空間在z方向上的長度有時可能受到永磁體強度的限制。類似地，在反向場配置中，r方向上的間隙可能受到在約束壁表面附近產生磁場強度的限制。在一些設計中，徑向間隙可以限於約10釐米或更小，約5釐米或更小。在某些設計中，當磁鐵616自身在約束表面附近提供足夠強的磁場時，間隙可能更大；例如，在某些設計中，間隙可能大於約10釐米。在某些設計中，內部磁鐵不是必需的。

波粒實施例

【0185】 以下簡要描述了第二類反應器構型，這裡稱為波粒實施例，並在圖#LLa和#LLb中示出。在波粒子實施例中，帶電粒子通過振盪靜電場被驅動旋轉。電中性物質被帶電粒子推動。通過對位於約束壁、內壁或連通環形區域的在方位角方向上的另一個電極施加電荷來產生電場。由於該實施例不需要磁場，所以在磁體結構中的限制不存在。例如，反應器的半徑可能大於可行的環形或盤狀磁體。此外，由於該實施例不需要內外電極之間的電流流動，所以同心電極施加的結構限制也不存在。在波粒設計的一些實施例中，約束壁的半徑可以大於約2米，在一些設計中大於約10米，並且在一些設計中大於約50米。與洛侖茲轉體的一些實施方案相反，反應器在z方向上的長度不受永久磁鐵的強度的限制，這種限制在同心電極實施例中可能出現。在一些實施例中，環形區域可以在z方向上的長度可以大於約1米，在一些設計中大於約10米，並且在一些設計中大於約100米。在一個實施例中，在反應器的z方向上存在曲率，使得約束壁形成環面環形形狀。一般來說，反應器的尺寸限制可以控制反應器的能量

需求和與生產成本。在波粒實施例中，可以通過影響環形區域的方位角偏移電極的數量和尺寸對旋轉粒子加以控制。沿著約束壁的相對較多數量的電極允使電場線被精細調製，從而提高電場用於移動帶電粒子的效率。在某些設計中，這是因為動態變化的電場主要沿方位方向而不是徑向驅動粒子。通常，反應器將具有至少三個方位角方向上的電極。一些反應器可以具有至少五個方位角的獨立的電極，一些反應器可以具有多於約50個方位角上的電極。在一些設計中，電極的數量根據反應器的尺寸變化。例如，具有約1米半徑的反應器有約20至約40個沿約束壁的方位角的獨立電極，而具有約2米半徑的反應器可具有約40至約80個方位的獨立電極。在一些設計中，反應器的圓周（以米為單位）與方位角上獨立內部或外部電極的數量比率在約3至約150之間，並且在一些設計中，該比率在約20和100之間。

【0186】 在一些設計中，電極通過電絕緣材料（例如氮化鋁或氮化硼）分開。絕緣材料足夠厚以保證電擊穿不會發生。最小厚度可以由絕緣材料的介電強度和施加到電極的電壓確定。在一些設計中，電絕緣材料包含靶材料（諸如硼-11的聚變反應物）和/或電子發射體。

【0187】 在一些設計中，當電極在方位角方向上具有較窄的寬度並且被電絕緣材料分離時，反應器的效率也可以得到改善。在一些設計中，電絕緣材料也可以是靶材料或電子發射體。在一些設計中，方位角方向上的電極寬度可以小於約10釐米，在一些設計中小於約5釐米，在一些設計中小於約2釐米。在一些實施方案中，反應器僅使用沿著約束壁的在方位角上獨立的電極。或者，在一些實施例中，反應器僅利用內部電極，或僅使用在z方向上結合環形區域的電極。在電極本身不定義出約束壁的設計

中，約束壁的表面可以由靶材料或電子發射體制成。例如，在一些設計中，電極通過包含由六硼化鏷條的套筒與環形區域分離。

【0188】 在一些設計中，約束壁配置有熱管理元件，例如熱交換器（例如，冷卻夾套）。熱交換器可用於防止電極過熱和/或將加熱的流體供給到熱力發動機以產生電能或熱能。在一些設計中，通過使諸如水的流體通過約束壁中的通道，可以從反應器中散發熱量。例如，方位角分離的電極的絕緣材料可以有內部通道使流體。

【0189】 在同心電極實施例中，內電極和外電極之間間隙有時受到限制，這是環形區域中可用於氣體電離的功率有限。在波粒配置中，相鄰定位的電隔離電極之間間隙也可以被約束。例如，在一些設計中，電極之間間距在約1毫米至約50釐米的範圍內，在另一些設計中，電極之間間距在約5釐米至約20釐米的範圍內。

【0190】 在某些設計中，波粒子反應器具有一種以上的操作模式。例如，可以採用第一階段來啟動或撞擊等離子體，然後啟動第二階段來驅動離子（間接驅動電中性粒子）。例如，可以在內電極和外電極之間徑向施加射頻電場以產生弱電離的等離子體，從而製備用於操作的反應器。一旦在內電極和外電極之間產生等離子體，反應器就可以轉換到另外一種模式：其中驅動信號按順序在施加在方位角分佈的電極，以驅動帶電粒子和電中性粒子旋轉。（在某些設計中，波粒反應器具有多種操作模式。例如，可以使用第一相來啟動或擊打等離子體，並且可以使用後一相在旋轉方向上驅動離子（和間接電中性粒子）。例如，可以在內電極和外電極之間徑向施加RF電場以產生弱電離等離子體，製備用於操作的反應器。一旦在內電極和外電極之間產生了等離子體，則電抗器可以轉變到其中驅動

信號被順序施加到方位分佈的電極以驅動帶電粒子和電中性粒子旋轉的模式。)

【0191】 用來施加到按方位角分佈的電極以驅動離子和電中性粒子旋轉的振盪信號的頻率，取決於反應器構造和預設的旋轉速度選。例如，驅動信號可以在約60千赫至1兆赫的範圍內施加，並且在一些設計中在約60千赫和1吉赫的範圍內施加。在某些設計中，驅動信號的頻率可能開始低，然後逐漸或突然增加。例如，驅動信號可以以相對低的頻率開始，例如60kHz，最終達到100百萬赫的頻率。

【0192】 在某些設計中，驅動信號使用受控電壓進行充電。為了避免在電極之間產生電弧，最理想的是使用高電壓和低電流，而不是低電壓下的高電流。在某些設計中，驅動信號在約1千伏至約100千伏之間施加到方位角上的獨立電極。在某些設計中，驅動信號可能對電極施加超過100 千伏。

【0193】 使用靜電力，用波粒實施例可以達到超過勞倫絲驅動的、具有相似構造的反應器中通常可以實現的旋轉速度（例如，相近的約束半徑）。在一些設計中，靜電驅動的反應器可以以至少約1000圈每秒的速率驅動氣態物質的旋轉，在另一些設計中至少約100,000圈每秒。在波粒實施例中，可以使用控制系統來控制電荷如何施加到電極。在一些設計中，控制系統使用使用高速攝像機或另一感測器確定的檢測速度作為回饋來調整施加到電極的電荷序列。在一些設計中，控制系統使用使用高速攝像機或其他感測器確定的檢測速度作為回饋來調整施加到電極的電荷序列。通常，方位角的獨立電極可以具有類似的結構，且可以由上述實施例的材料製成。

混合設計反應器

【0194】關於圖6a至6f簡要描述了另一種通用反應器的結構，這裡稱為混合反應器類型。該配置採用勞倫絲轉體和波粒驅動器來保持顆粒在環形空間中的旋轉運動。當在混合反應器中運行勞倫絲反應器時，可以應用上述描述的第一實施例的一些設計。類似地，當使用混合設計的方位電極進行操作時，可以應用上述波粒實施例的一些結構。

【0195】如反向場實施例中所述，使用第一實施例描述的磁性材料製成的永磁體（616和626）施加徑向磁場。在一些設計中，可以用多個具有徑向取向軸的沿著方位角偏移的電磁體代替永磁體，使磁場基本上沿r方向貫穿整個約束區域。在一些設計中，約束壁表面可以含一層或多層保護磁性材料。在一些設計中，保護層可以含有聚變反應物或電子發射體的靶材料。在一些設計中，約束壁可具有內部冷卻系統，將材料保持在其熔融溫度以下，並防止磁體退磁。

【0196】在同心電極實施例中，內部電極和外部電極之間間隙受到可用於在環形區域中電離氣體的功率的限制。類似地，在混合反應器實施例中，在z方向上分離電極660a和660b的約束區域或環形區域受到限制。例如，在一些設計中，電極之間間隔約為1毫米至約50釐米，在另一些設計中，電極之間間隔約為5釐米至約20釐米。

【0197】在同心電極實施例中，z方向上的環形區域的長度有時會受到永磁體的強度限制。類似地，在混合設計方案中，r方向上的間隙有時可能受限於在約束壁的表面附近產生磁場強度的需要。在一些設計中，徑向間隙可以限制為約10釐米或更小，或約5釐米或更小。在某些設計中，當磁體616在限制表面附近提供足夠強的磁場時，間隙可能更大；例

如，在一些設計中，間隙可以大於約10釐米。在某些設計中，可能不需要內部磁體。

【0198】 在混合設計中，控制系統用於控制施加到方位角上分佈的獨立電極的信號。在一些設計中，控制系統可以從感測器接收回饋以調整施加到電極的電荷序列。通常，電極（660a和660b）可具有類似的結構，且可以由在第一實施例中描述的適合製造電極的材料製成。

【0199】 在某些設計方案中，在進行聚變反應時或在進行聚變反應之前，混合設計反應器的模式發生轉換。例如，反應器可以在轉換到波粒驅動器之前使用勞倫絲轉體以維持粒子旋轉。在某些條件下，勞倫絲力驅動的轉體在啟動環形空間中的顆粒旋轉效率更高。一旦環形空間內的顆粒在反應器內一定的旋轉速度，繼續使用勞倫絲轉體不再有優勢，則可以切換到波粒驅動操作模式。在一些設計中，通過轉換到波粒驅動操作模式，可以實現更高的粒子速度和更多的能量產生。在一些設計中，通過轉換到波粒驅動操作模式，可以通過調整施加到沿方位角分佈的電極（660a和660b）的驅動信號序列高精度地調控產生的能量。在使用電磁體產生電場的某些實施例中，當反應器進入波粒操作模式時，可以終止用於控制磁場的電流源。這可以用於防止勞倫絲力在z方向上作用於帶電粒子。

電子發射體

【0200】 如本文其他地方所描述的，約束壁有時被製成至少部分電子發射材料，這裡稱為電子發射體。這些材料在高於特定溫度下，熱離子發射電子。例如，一些基於硼的電子發射體的發射溫度在約1800克耳文至約2000克耳文的範圍內。在一些設計中，電子發射體可以是粉末形式，其被壓實，燒結或以其他方式轉化成適於放置在環形區域內的形式。

在一些設計中，可以使用物理氣相沉積將電子發射材料燒結或沉積到反應器的約束壁上。在其他設計中，電子發射器可以鍛造成形成約束壁的一部分的結構，或者附著在約束壁。

【0201】 一些電子發射體是低逸出功的物質，在反應器內的高溫和其條件時，其不會降解。電子發射體的實例包括氧化物和硼化物，例如氧化鋇、氧化鋇、氧化鈣、鋁、氧化物、氧化鈦、六硼酸鏷、六硼化銻、六硼化鋁、六硼酸鋁、六硼化鈮、六硼化鈮、六硼化鈮、六硼化鈮和六硼化鈮。在一些設計中，發射體可以是碳化物和硼化物等過渡金屬，例如碳化鈳、碳化鈳、碳化鈳和二硼化鈳。在一些設計中，發射體可以是聚合反應的反應物，例如 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{15}\text{N}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、和氬。在一些設計中，電子發射體可以是包含聚變反應物的化合物。例如，六硼化鏷可以充當電子發射體和用於質子--硼11聚變的靶材料。在一些設計中，聚變反應產物可以用作電子發射體。在一些設計中，電子發射器可以是兩種或更多種材料的複合材料，其中至少一種材料具有低逸出功並在運行期間發射電子。

【0202】 在一些設計中，電子發射體作為固體元件附著在反應器的約束壁中。在一些實施例中，電子發射器是薄片或扁平狀的結構連接到約束壁上，在環形區域中凸起並不明顯。圖20a描繪了電子發射器的橫截面。在一些實施例中，使用諸如夾子或螺釘的機械緊固件將這些電子發射器附接到約束壁的表面。在一些設計中，電子發射器位於約束壁內的狹槽，並通過摩擦力而保持固定。例如，可以用凹槽或夾鉗將電子發射器固定。在某些設計中，發射器通過加熱、粘合劑或其它工藝附著在壁上。在一些設計中，電子發射器厚度小於約1.2釐米，在另一些設計中小於約6釐米，小於約3釐米。方位角方向或z方向上的片狀結構尺寸受到反應器大小

的限制。圖20b描繪了幾種配置，其中電子發射器2036可以沿著約束壁2010的表面對稱分佈，在一些配置中，電子發射器可以僅位於幾個特定區域。

【0203】 在某些實施例中，當發射器設置在約束壁的表面時，它們通過反應器操作中摩擦和/或等離子體加熱來加熱。在一些設計中，可以使用附加的方法來向電子發射器添加能量以增加電子發射速率。當反應器仍然相對冷卻時，在反應器的初始操作期間可以使用另外的方法來加熱發射器。在一些設計中，可以使用增加電子發射的附加方法來控制聚變反應的速率。

【0204】 在一些實施例中，約束壁上的電子發射器電連接到電源以增強電子發射。例如，在一些實施例中，電流通過電子發射材料內的細絲從而提供電阻加熱。在某些設計中，燈絲由諸如鎢的難熔金屬製成。在一些設計中，例如當約束壁接地時，電子發射器可以通過電絕緣材料與約束壁的接地部分分離。在某些設計中，直流電被施加到細絲上。在一些設計中，通過向電子發射器施加交流電來進一步改善或控制電子發射；如具有RF或微波信號的電流。

【0205】 圖21A-b描繪了使用電阻加熱來控制同心電極反應器中的電子發射。圖21a是反應器的z方向的視圖，其中有內部電極2120，外部電極2110，外部電極2110由環形區域2140與內部電極分離，沿約束壁2112放置的電子發射裝置2136由電源2135供電。圖# 100b是約束壁上的電子發射裝置的放大視圖。電子發射裝置包括由燈絲2134加熱的電子發射體材料2130，例如六硼化鏷。在一些設計中，裝置可以包括2137和2138的絕緣層，其可以提供與外部電極和/或約束壁（假設它們不同）的

電和/或熱隔離。這些絕緣層可以由氧化鋯，氧化鋁，氮化鋅和氧化鎂等陶瓷材料製成。在一些實施例中，在反應器的操作期間可以調整電子發射裝置的位置。例如，為了增加由旋轉物質的摩擦加熱引起的電子發射，可以使用致動器將裝置徑向向內移動到環形區域。或者，為了限制反應，可將裝置從環形區域拉出以限制電子的釋放。

【0206】 在一些實施例中，電子發射器在一端可以具有尖銳點或錐形結構，以改促進場電子發射。例如，當電子發射體被供給電位時，由於幾何形狀變窄，在點附近產生的強電場可能導致場電子發射集中在該點。

【0207】 在一些實施例中，使用一個或多個雷射器來增加或控制發射器的電子發射。如圖22所示，反應器2200可以裝有雷射器2231，將環形區域2240內的光引導到電子發射器2230上。如圖所示，來自雷射器的光可以通過絕緣光纖2239穿過或沿內部電極2220。鐳射可以用於熱電子發射的發射體，也可以作用於約束壁的其他材料上從而表現出光電效應。例如，當電流沒有中和掉撞擊產生的光子從而產生不平衡時金屬和導體可以表現出光電效應。雖然圖22描繪了第一實施例，但在反向電極性實施例中，鐳射可以用於內部帶負電的電極，以增加電子發射。

氣體供給系統

【0208】 反應器可以具有用於引入聚變反應物和移除聚變產物的一個或多個氣閥。在某些設計中，可以使用標準化的氣閥。例如，用於低壓沉積和蝕刻室的氣閥可能適用於反應器。在一些設計中，氣體反應物在裝置內部某處釋放到約束區域中；例如，反應物物質可以通過內部電極。在一些設計中，氣閥可以位於z方向的約束區域的一端，在其它設計中，氣體反應物物質通過位於約束壁內的閥被引入約束區域。用於聚變產物的出

口閥可以放置在進給閥相似的位置。當在反應器操作期間去除聚變產物時，出口閥可以位於約束壁上或鄰近限約束壁的位置，但是在z方向上偏約束區域。在一些設計中，入口和出口閥可能需要與電極電絕緣，以免接地引起短路。

【0209】 入口和出口閥還可以設置真空泵系統，以說明氣體物質進出反應器。在一些設計中，閥可以包括流量計，其控制從反應器中加入或移出的氣體量。在一些設計中，流量計可以連接到反應器的控制系統，以限制放入室中的氫或反應物物質的量。在一些設計中，氣體入口在約束區域附近引入電中性粒子，氣體出口除去在反應器z方向聚變區域之外的電中性粒子。在一些設計中，泵送系統控制沿著反應器的z方向的電中性粒子分佈，以除去可能會降低將聚變產物（例如， α 粒子）動能轉換成電能效率的電中性粒子。

【0210】 雖然所討論的實施方案描述了氣體種類，但在其它實施方案中，聚變反應物以液體形式引入到環形區域中。在一些設計中，不是用氣體形式的聚變反應物填充環形區域，而是可以用液體燃料填充或部分填充該環形區域。例如，可以使用含有氫離子的液體如液體氫，氦，烷烴如丁烷或甲烷液體和液體氫化物作為液體燃料。在某些設計中，液體燃料可能在進入腔室後迅速蒸發。在一些設計中，通過向反應器中加入液體燃料可以控制反應器內的壓力。例如，通過使用溫度差和已知的環形區域的體積，約束區域內的壓力可以使用理想氣體定律計算。在一些設計中，可以仔細監測反應器內氣體反應物壓力，使得維持高的電中性粒子密度，而不會影響反應器的結構完整性。

【0211】 當反應器是勞倫絲轉體時，可以足量或在熱條件下加入液

體燃料，使得液體在進入反應裝置時不立即蒸發。在這種設計中，可以通過在電極之間施加電位來使電流通過液體燃料。在某些設計中，用帶電粒子如鉀接種液體。在存在磁場的設計中，勞倫絲力驅使液體燃料中的電中性粒子和帶電粒子旋轉。隨著旋轉柱的動能增加，沿著約束壁的邊界層附近的液體可能蒸發，釋放可能與約束壁上的目標材料聚變的氫氣或另一種反應氣體。例如，當從液體燃料中釋放氫氣時，可能發生質子-硼11的聚變，約束壁含有六硼化鏷。在一些設計中，在旋轉液體和約束壁之間產生的氣態層可能產生滑動層，通過減小液體和壁的作用力使得環形區域中的液體旋轉的更快。在一些設計中，液體可以吸收熱量並且可以減少電極熔化的可能。由於與氣體相比，液體可能具有高密度的聚變反應物，所以液體可以長時間使用而無需更換。儘管不限於使用液體燃料，但是在某些設計中，如果壓力超過閾值，則可以用安全閥從反應器釋放氣體。在某些設計中，例如運輸應用中，聚變應物可以以液體形式儲存，並作為液體或氣體而輸送到反應器中。通過儲存液體形式的聚變反應物，燃料供應是小型且緊湊的。

【0212】 在一些設計中，液體燃料可通過加壓罐供應到反應器。在一些設計中，聚變反應物（例如氫）可以存儲在小膠囊中。例如，氫可以儲存在玻璃膠囊中，通過約束壁的埠供給給反應器。在某些設計中，氫氣可以以加壓形式（例如，幾個大氣壓）提供，並且在一些設計中，氫氣可以以液體形式提供。在反應器已經運行的設計中，反應器內的溫度可以熔化儲氣膠囊的殼，使燃料立即或在短時間（例如，幾分鐘）內釋放。在一些設計中，例如當反應器冷卻而不運行時，可以用雷射器（如圖22所示）來破壞膠囊材料並釋放反應物或燃料。在諸如汽車應用的設計中，使用膠

囊存儲少量氫的聚變反應物，可以減少或去掉安全存儲反應物所需的硬體（例如，加壓罐）。

【0213】 在一些設計中，可以將含氫的固體化合物諸作為聚變反應物加入反應器中。例如，當在反應器中消耗氫燃料時，可以通過約束壁的埠將聚乙烯或聚丙烯製成的聚合物燃料塊提供給反應器。一旦進入反應器，通過反應器操激（例如圖22中所示的鐳射）引起的高溫足以分解聚合物釋放氫氣。在一些實施方案中，氨硼烷（也稱為硼烷氨）可用作氫燃料當反應器達到大於約100攝氏度的溫度時，氨硼烷釋放分子氫和氣態硼氮化合物。在一些設計中，氨硼烷或硼 - 氮化合物可以作為電子發射器，在一些設計中，來自氨硼烷的硼原子可以在操作期間與氫原子發生融合聚變反應。在許多應用（例如，汽車應用）中，使用固體燃料可減少或消除存儲氣體燃料或液體燃料的硬體以保證安全性且增加便利性。

冷卻系統

【0214】 在某些設計中，為了使反應器能夠持續運行，必須冷卻反應器以防止電極，磁體和/或其他部件過熱。在一些實施方案中，反應器可以通過完全浸入液體來冷卻。在一些實施方案中，反應器包括散熱器，該散熱器通過傳導將熱量從反應器吸出，並將其轉移到諸如空氣或液體冷卻劑等流體介質。作為示例，可以使用熱交換器。可以使用風扇或泵來控制流速狀況並幫助傳送熱量到流體介質。根據反應器內監測到的溫度，可以調節流體速度，從而在層流和湍流之間調節流體流動。在一些實施方案中，流體通過反應器外部的冷卻套，在一些設計中，冷卻管可用於冷卻反應器內的組分。如本文別處所述，散熱器可以用於將熱量傳遞到流體，這一流體在熱力發動機中產生電能。可用於冷卻反應器的液體包括水，液體

鉛，液體鈉，液態鈹，熔融鹽,熔融金屬和各種有機化合物，包括一些醇，烴和鹵代烴。

電源

【0215】 反應器可以包括用於向電極，電磁體和其它電氣部件提供電流的一個或多個電源。電源可以控制兩個終端（例如，同心電極）的電流和/或電壓。在一些實施例中，電源能夠提供約200伏至約1000伏特的最大電壓。例如，在一些實施例中，電源可以向電極提供高達600伏的電壓。在一些實施例中，小規模反應器可能能夠提供約0.1安至約100安的電流和/或提供約1千瓦的功率。一些中等大小的裝置，反應器可能提供約1安至約1千安的電流和/或約5千瓦的功率。一些大規模裝置，反應器可能提供約1安至10千安的電流和/或提供數百千瓦的功率。

【0216】 根據反應裝置的工作模式，可以使用電源來提供直流或交流電。在一些實施例中，將交流電施加到電極以擊穿等離子體。在某些設計中，相比直流電流衝擊穿等離子體，擊穿環形區域中的等離子體所需的電壓可能減少約10%。在使用交流信號擊穿等離子體時，電源在大於約1千赫，或者在一些設計中大於約1百萬赫的頻率提供交變電流或電位信號。

【0217】 在一些配置中，例如當電磁體用於提供軸向磁場時，交流電可以施加到電磁體和電極。在一些設計中，可以將交變信號施加到電極和具有相同頻率但是異相的電磁體上。在一些設計中，電源可以以大於約500Hz或大於約1kHz向電極或電磁體施加電流或電壓信號。在一些設計中，電磁鐵的工作頻率與施加到電極上的交流電流相同，從而可以保持顆粒旋轉。在一些設計中，可以使用市場上的電源來向反應裝置或電磁體的

電極施加電流或電壓信號。合適電源供應商的包括前沿能源公司 (Advanced Energy Industries) 和 TDK 拉姆達美國 (TDK-Lambda American)。

感測器

【0218】 當運行反應器時，可以監測各種參數以控制能量輸出的速率提高效率、防止部件的故障等。例如，可以監測反應器的溫度以確保反應器的部件不超過額定最大溫度值。如果永久磁鐵過熱，可能會退磁，如果電極或任何其他部件過熱，可能會熔化。在某些設計中，反應器的操運行會達到較高的溫度。例如，一些電子發射體必須獲得足夠的熱能以釋放電子到環形區域。可以使用諸如熱電偶，紅外圖像和熱敏電阻之類的感測器監測反應器內的溫度。在某些設計中，可以通過測量反應器內其他位置的溫度來推斷反應器內部的溫度。例如，外部電極的內表面的溫度可以通過監測外部電極的外表面溫度來推斷。在某些設計中，通過外部位置間接測量溫度，可以使用低成本溫度感測器，例如矽帶溫度感測器。

【0219】 在一些實施例中，可以監測反應器內的氣體壓力。通過監測電子發射器前面的壓力，可以獲得關於電子密度的資訊，因為它們緊密地集中在約束壁上。控制器可以使用室內的壓力測量來調節進入和排出環形區域的氣體物質的流速。在一些實施例中，可以使用每秒拍攝數百或數千張圖像的照相機來監視約束區域內的旋轉速度。在一些設計中，可以通過引入發螢光或具有可檢測的光學特徵如氫或量子點的物質來幫助測量反應器內物質的旋轉。在一些實施方案中，可以監測約束區域的氣體混合物來判斷聚變產物，例如 4He 和 3He 。在一些實施方案中，可以使用原位質譜儀(例如Hiden Analytical的殘餘氣體分析儀，可以檢測氣體樣品中的少

量氬)、光譜儀或NMR感測器進行聚變產物和反應物的檢測。在一些實施例中，反應器可以配備蓋革計數器以檢測輻射水準。

【0220】 圖23a-c示出了如何使用核磁共振傳感來確定同心電極實施例中的氣體反應物的組成的示例。圖23a描繪了反應器的結構，其有內部電極2320，外部電極2310以及z方向通過環形區域的基本上均勻且不變的磁場2391。軸向施加的磁場用於對準旋轉物質的核自旋，可以通過如本文所述的超導磁體施加。在一些設計中，軸向磁場大於約0.1特斯拉，在某些設計中，軸向磁場大於約0.5特斯拉，在某些設計中，通過環形區域的軸向磁場大於約2特斯拉。

【0221】 當需要檢測時，通過在方位角方向施加RF脈衝來擾動環形區域內旋轉物質的原子核旋轉。圖23b描述了如何通過在內部電極的z方向上施加交流電來產生方位角方向的時變磁場2392。在一些實施例中，穿過中心電極的交流電流在約60Hz至1MHz之間的頻率，在另一些設計中約為1MHz至約1GHz的頻率。用時變磁場擾亂物質的排列之後，使用如圖23c所示的檢測線圈監測重新排列的物質原子核自旋速率。檢測線圈2390基本垂直於反應器的長軸（z軸），並且通過被旋轉物質吸收和重新發射的電磁輻射而監測通過線圈的電流。在某些設計中，可以使用類似於醫學的核磁共振系統中使用的檢測線圈。

控制系統

【0222】 可以將監測的參數輸入控制系統，該控制系統維持系統元件完整性並使反應裝置保持適宜聚變反應的狀態。控制系統可以控制聚變反應的所有參數，且在一些設計中可以控制其他操作，例如熱能收集或利用過程以轉換成電能或其他有用形式的能量。在某些實施例中，控制系統

在發熱和熱量提取之間保持平衡。例如為了保持該預設和額定的平衡，控制系統可以控制施加到反應器電極的電能（例如，通過調製脈衝延長或縮短每個脈衝之間的時間段和/或改變用於產生等離子體的電壓）、改變磁場（如用可調磁鐵結合超導磁體）、改變反應物的密度。

【0223】如本文其他地方所討論的，一些參數可能需要在限定範圍內，使得滿足這兩個條件。在某些設計中，控制系統接收識別能量資訊，並相應地調整條件。控制系統還可以具有閾值，當滿足時，啟動自動關閉過程以防止對反應堆或操作者的上傷害。例如，如果約束壁的溫度超過某一閾值或輻射達到閾值，則反應器可以停止聚變反應。控制系統可以通過--例如接地所有電極、閉合氣體輸入閥和/或引入惰性氣體物質例如氬氣，來停止反應器。

【0224】控制系統2462可以發送控制信號2463以根據需要調整反應器2464的各種參數設置，從而控制能量輸出2465。在一些設計中，控制系統可以提供例如圖24所示的封閉回饋。基於來自感測器2460的測量輸入參數和預期的能量輸出信號2461，控制系統2462可以根據需要發送控制信號2463以調整反應器2464的各種參數設置，以控制能量輸出2465或滿足其他規格。控制器使用的輸入參數可以包括溫度，壓力，流速，氣體組成分數（例如分壓），粒子速度，電極之間的電流放電、電壓等。在某些設計中，控制系統利用一個或多個參數的歷史資料。例如，儘管瞭解特定的溫度值可能很重要，但是瞭解溫度波動的速率和/或幅度也可能很重要。可由控制器調節的反應器參數包括施加的電流，施加的電壓，施加的磁場強度（在電磁鐵的設計中）和氣體流速（例如氬氣流量）。通常，控制器將控制信號傳遞給關聯設置的反應器部件。例如，可以將控制信號傳

遞到電源以指示電源施加指定的電壓。在某些設計中，也可以設置控制系統的輸入參數。例如，在確定應該施加什麼電壓時，控制器可以調節施加到電極的電流和/或電壓。在一些設計中，控制器可以通過機器學習來改進，使得反應器隨時間變得更有效，不受設備中的物理變化的影響（例如，當部件失效並被替換時）或預期能量需求。

【0225】 反應器的某些操作特徵可以是獨立控制的。例如，可以使用獨立於負責調節反應器的（例如電流和氣體流速）的控制系統來控制冷卻流體的流量。在另一個實例中，電子發射裝置，如圖21a所示，有接收電子發射器的測量溫度的控制器，並且確定施加到燈絲上以提供電阻加熱的電流。

【0226】 上述控制系統可以採用裝置化或集成方式的電腦軟體控制邏輯來實現。有很多可能的方式來控制操作。基於本文提供的公開內容和教導，本領域普通技術人員將理解如何使用硬體和/或硬體和軟體的組合來實現控制。

【0227】 在某些設計中，可以用任何合適的電腦語言寫控制系統（例如Java，LabVIEW，MATLAB，C ++或Python）軟體代碼，再由處理器執行，例如使用常規或物件導向的語言。軟體代碼可以作為一系列指令或命令存儲在電腦可讀介質上，諸如隨機存取記憶體（RAM），唯讀記憶體（ROM），硬碟驅動器之類的磁介質或軟碟或諸如CD-ROM的光學介質。在某些設計中，可以使用FPGA（現場可程式設計閘陣列）測試和設計控制系統，然後通過ASIC過程製造。在某些設計中，控制器可以是安全地存儲和執行控制邏輯的單個晶片。任何這樣的電腦可讀介質可以設置在單個計算設備上，並且可以存在於系統或網路內的不同計算設

備。

輻射遮罩

【0228】 在一些實施例中，例如當反應器是非中子反應或基本上是非中子反應時，反應器可能需要很少的遮罩來減少輻射暴露。當有中子輻射的顧慮時，反應器可能配備適當的遮罩。中子容易通過大部分材料，相互作用足以引起生物損傷。在某些設計中，反應器可以放置在吸收中子的外殼中。在一些設計中，反應器的約束壁可以包括用於吸收中子的外部層。在一些設計中，遮罩層可以是具有高水含量的混凝土，聚乙烯，石蠟，蠟，水或其它烴類材料製成。在一些設計中，遮罩層可以包括作為中子吸收劑的鉛或硼。例如，可以使用碳化硼作為遮罩層，其中混凝土成本不高。在一些實施例中，反應器在z方向上的端部可以包括諸如氮化硼的材料，其不僅吸收中子，而且是熱和電絕緣體。在一些設計中，諸如六硼化鏷的電子發射體具遮罩中子輻射的附加功能。在某些設計中，例如大型反應裝置，水，油或礫石罐可以放置在反應器上，以提供有效的遮罩。遮罩層的厚度部分取決於使用什麼材料，反應器所處的位置，聚變反應的類型和反應器的尺寸。在一些實施例中，遮罩層大於約10釐米，在一些設計中，遮罩層大於約100釐米，在一些設計中，遮罩層大於約1米。

可替換元件

【0229】 如本文所述的聚變反應器可以是高度可配置和裝置化的，大多數元件可以替換和/或拆卸。一些元件是永久性的，並且在反應堆的使用壽命期間不會磨損，另一部分元件在一定數量的操作迴圈或時間之後更換。在正常工作條件下，反應堆的某些部件可能最終會失效，需要更換。當操作條件超過某些閾值時，元件可能損壞或磨損得更快。對於每個

可替換元件，可能存在用於拆卸元件、處理和更換的標準流程，以及預估元件損耗的一系列指示器和可行的診斷程式。在某些運行條件下，反應堆的某些部件可能最終會失效而需要更換。例如，由於氫脆化，電極可能最終失去其結構完整性，並且靶材料最終可能被消耗。在一些設計中，諸如內部或外部電極的部件可能產生內部應力並需要更換。

【0230】 如本文所述的聚變反應器可以是高度可組合和模組化的。在某些實施例中，可以替換和/或互換一個或多個元件。一些部件是永久性的，在反應器的使用壽命期間不會磨損，一些部件在一定的操作迴圈或操作時間之後需要更換。對於每個可更換部件，可能有用於拆卸、處理、翻新和/或更換部件的操作程式。此外，可能存在一個或多個儀錶和診斷儀器以指示和/或判斷組件的消耗程度。

【0231】 可替換部件的實例包括反應器中的一個或多個電極、聚變反應物，容器中聚變反應物（例如氫氣罐）和與反應器相連的能量轉化裝置。

【0232】 應該更換部件的表現包括電極導電率的降低、部件運行的時間以及部件的光學性質（例如，可利用光學檢測部件表面的變化）。機械故障可以通過目視檢查來確定，或者在某些設計中，通過監測測量的參數，例如電極的溫度、壓力和導電率來確定。在一些設計中，控制系統包含用於確定電極或其他部件的機械故障的程式。

【0233】 在一些設計中，電極的導電率可能隨時間降低。由於等離子體的不穩定性，可以在電極上形成電絕緣介電塗層。如果電極的導電率和/或導電性降低，則反應器效率可能降低和/或需要過量的供電。如果沒有採取任何措施來減緩反應器導電率和/或導電性的下降，則可能造成反

應器電害和/或熱害。儘管本文的大部分討論涉及確定電極的導電率和/或導電性，但應理解，導電率在電極中不同位置有所不同。例如，在長時間操作之後，發生反應一側的電極表面的導電率可能比電極內部的導電率低得多。作為另一個例子，電極中原始材料的導電率可以在操作期間保持基本不變，但是在電極發生反應一面表面上形成的介電膜將使電極的總導電率顯著降低。可以用電阻率和/或電阻來代替導電率和/或導電率。

【0234】 可以採用各種技術來監測電極導電率和/或電導性，確定是否需要注意或替換電極。在一個實例中，使用電極的幾何形狀，可以在反應器不工作時，通過測量電極表面上兩點之間的電阻來確定電極的導電率。該測量可以在例行系統檢查期間手動執行，如使用萬用表。在一些設計中，反應器配置有測量電路，該測量電路在操作迴圈之間自動測量電極的電阻。在一些設計中，反應堆的控制系統可以設計成從測量的電阻自動確定電極的電導。可以確定電極導電率的另一種方式是通過執行診斷迴圈，其中約束區域中的氣態反應物被另一種氣體替換，在約束區域內產生等離子體。例如，氫氣可以用氘氣，氦氣或氖氣代替。控制系統可以監測等離子體的電學性質，測量電極的電壓和通過電極的電流。基於氫等離子體的電學性質，可以確定電極的導電率。例如，可以通過將測量的氫等離子體（或另一種等離子體）的電學性質與預期的電學性質進行比較來確定每個電極的導電率。在一些設計中，等離子體的預期電學性質，例如氫等離子體，可以通過模擬或通過測量不具有介電塗層的新反應器上的電學性質來確定。

【0235】 可以為反應器電極預定導電率或電導值的額定值，超越額定值即需要維修或更換電極。例如，如果電極的導電率低於其預設值的80

%左右，則可以更換或處理電極以恢復導電率恢復到適當水準。

【0236】 在一些實施方案中，當電極導電率或導電率降至可接受水準以下時，即執行清潔迴圈。例如，清潔循引入清潔氣體，例如氫氣，進入約束區域並產生去除部分或全部介電塗層的等離子體。在一些設計中，弱電離的等離子體可能足以去除介電塗層。在一些設計中，氫氣可在清潔迴圈期間被完全電離。取決於降解的化學性質，可以應用化學修復處理。例如，如果電極降解是由氫化物或其他形式的氫引發的還原形成的，則可以用氧化劑如含氧等離子體處理受損電極。

【0237】 在一些設計中，如果電極的導電率低於一定水準（例如，預設值的50%左右），則可確定反應器操作不安全。這可能表明反應器已形成一層厚介電膜，因此需要來自電源提供過大、不安全的功率。在一些設計中，控制系統或安全系統可以關閉運行直到更換或恢復受影響的電極。在一些設計中，反應器控制系統包含用於確定電極或其他部件的機械故障然後觸發警報或自動關閉反應器的程式。

【0238】 在一些實施方案中，反應器中的一個或多個電極或磁體包含保護或消耗層。在一些設計中，該消耗層是一個套管（例如，形成約束壁內表面的套管），可以按設計間隔更換。在一些實施方案中，可以去除諸如電極或套管的金屬部件來進行修復，例如，退火以消除可能由於熱迴圈而產生的內應力。在一些設計中，例如，當部件發生氫脆化時，可以移除部件並且處理部件材料以製造新部件。在某些設計中，脆化部分，例如鈹電極，通過在真空下退火可以恢復到具有延展性的狀態。例如在一些設計中，可以通過在真空下約1200攝氏度下退火來恢復脆化組分。

【0239】 靶材料（聚變反應物）最終可能被完全消耗因此需要更

換。例如，一些實施方案使用六硼化鏷，其含有硼-11作為質子--硼-11聚變反應所需的反應物。一旦耗盡，就需要更換這種材料。由於熱迴圈，六硼化鏷也可能變脆並失效，這可能導致反應器維持生產性聚變反應的能力降低；如果六硼化鏷組分（例如放置在約束壁上的試樣）被移出旋轉顆粒的路徑，則六硼化鏷的失效不再具有足夠的硼-11可能導致聚合反應的數量減少，反應速率將減少。在一些設計中，控制系統可以向操作者通知將對應於已經被耗盡或移出約束區域的目標材料的功率下降。在某些設計中，控制系統可能會將諸如六硼化鏷等消耗材料達到預定使用限度並且應更換時通知操作員。

舉例

【0240】 以下幾個實施例代表是根據本文所述的基本原理實施的一些實施方案。

1.) 負電極(外電極)

【0241】 外電極，有時稱為“護罩”，包括圓柱形金屬環，其具有固定六硼化鏷或其他靶材料的多個連接點。由於難熔金屬的高耐熱性，護罩的組成通常是難熔金屬，例如鉭（Ta）或鎢（W）。然而，反應器的某些實施方案使用較低熔點的金屬，例如合金316不銹鋼。這些實施例可包括液體冷卻回路，防止護罩達到合金的熔化溫度。如前述，外電極可以是更負電極或更正電極。

導電率

【0242】 通過利用來自外部電源的電力，在反應器中正極和負極之間撞擊等離子體。該過程由兩電極上的電壓和穿過電極和等離子體的電流介導。撞擊等離子體並啟動聚變反應所需的電壓與兩個電極的導電率直接

相關。如上所述，可以在負電極上形成絕緣塗層，從而影響電極的導電性。

【0243】 用於即時確定外電極導電率的方式是使用數位萬用表在兩點之間測量電阻。在一些實施方案中，測量電阻值輸入評估（QA）軟體，顯示出外電極的導電率 and 操作狀態。

【0244】 用於確定導電率的第二種分析方法是在反應器中撞擊輝光放電氬氣等離子體。這是通過控制軟體隨時監測氬等離子體的電氣特性（電壓和電流）實現的。通過內部校準比較，控制軟體可以確定電極的導電率並將資料發送到評估（QA）軟體。

【0245】 如果評估（QA）軟體指示組合物金屬的導電率低於標準額定值的80%，則認為AR單元在不再在最佳操作方案而進入非最佳操作狀態。如果導電率低於標準額定值的50%，則稱AR反應器處於不安全操作狀態，因為這將電源提供過多電力而存在潛在電害和熱害。如果導電率為0%，則表明在負電極上形成了完整的絕緣層，系統不可操作。

【0246】 操作：正常繼續操作單元。

【0247】 非最佳操作：使用提供的控制軟體在AR反應器上運行氬氣清潔迴圈。重複直到導電率回到“最佳操作”範圍。如果導電率沒有改善，執行下面的“不安全操作”。

【0248】 不安全操作：應清潔外電極。

結構完整性

【0249】 護罩的機械結構可能被損壞，變形或脆化。這可能由於很多不同的原因。

【0250】 冷卻系統的故障或冷卻系統的不正確操作可能導致反應器

內的極端溫度超出安全操作值。這些極端溫度可能導致熱衝擊使護罩上或護罩內出現裂縫。另外，如果這些極端溫度接近護罩材料的熔點，則護罩本身將開始變形並熔化。

【0251】 用於檢測結構完整性的即時可實施診斷方法是控制軟體的異常溫度警報提示目視檢查。控制軟體可以監控裝置幾個不同部件的溫度，並檢查每個部件是否保持在安全指令引數內。如果任何此類元件的溫度超出安全操作值，則可能會觸發溫度指示器警報。在極端設計中（例如過熱狀態持續時間過長），系統可能會自行關閉並需要對護罩的完整性進行強制性目視檢查。如果護罩損壞，可將其送到QA團隊進行檢查和分析。

2.)正電極（內電極）

【0252】 外電極，有時稱為“護罩”，包括圓柱形金屬環，其具有固定六硼化鎢或其他靶材料的多個連接點。由於難熔金屬的高耐熱性，護罩的組成通常是難熔金屬，例如鉭（Ta）或鎢（W）。然而，反應器的某些實施方案使用較低熔點的金屬，例如合金316不銹鋼。高溫中心頭可以運行更長時間，因此可以減少更換頻率。中心電極棒通常由316不銹鋼合金製成，因為它不會遇到與頭部相同的極端溫度。

【0253】 在一些實施例中，中心電極棒用液態水冷卻以防止過熱。在利用高溫頭的實施例中，頭部用鉬（Mo）螺釘連接到杆上。在利用低溫頭的實施例中，頭部也是水冷卻的，並被焊接或焊接到杆上，使得冷卻回路是連續的。

【0254】 與外電極的情況一樣，內電極的導電率介導等離子體的電學行為。導電率的變化將導致擊穿並維持用於聚變反應的等離子體所需的

電壓的變化。如上所述，在反應器內發生的等離子體和聚變反應的不穩定性可導致內電極表面上的絕緣塗層的積聚，從而影響其導電性。

【0255】 用於確定中心電極的導電率的測量技術（上述的各種操作方案）與用於內電極的相同。

【0256】 就元件的結構完整性而言，內電極具有與外電極（或護罩）相同的操作風險。它可能損壞、變形或脆化；然而，由於在內電極內部存在液體冷卻通道，除了控制系統對特定部件的熱監控之外，還存在用於故障檢測的方法。

【0257】 如果中心電極棒的溫度（或上面作為替代實施方案所述的液體冷卻的中心電極頭的溫度）接近組合材料的熔化溫度，則棒（或頭部）的外表面會被破壞，使得水蒸氣和液態水混合物進入真空室。這可能是由於冷卻系統的故障或不當使用，以及在中心電極棒（或頭部）本身上出現持續的等離子弧而發生的。一旦發生這種情況，由於水蒸氣通過裂口進入腔室，壓力會瞬間升高。控制系統檢測到這種壓力上升並立即關閉系統，並出現錯誤故障信號，確保立即進行必要的目視檢查。

【0258】 六硼化鏷（通常稱為 LaB_6 ）是一種耐火陶瓷材料，由於其低功函數而在科學工業中用作電子發射體。在反應器中， LaB_6 通過沿內壁的均勻分佈的連接點連接到負電極。 LaB_6 含有聚變反應所需的固體硼燃料，一旦燃料耗盡就需要更換。

【0259】 在自然界中硼有兩種主要的同位素（相同數量的質子和不同數量的中子的原子序數）， ^{10}B 和 ^{11}B 。這兩種同位素中最豐富的是 ^{11}B ，這種形式存在的硼中占有所有硼的80%。由於這也是發生聚變反應所需的同位素，因此可能需要知道 LaB_6 燃料中這種特定同位素的相對濃

度。這種檢測濃度的方法有多種，包括電感耦合等離子體發射光譜（ICP-OES），熱電離質譜（TIMS），二次離子質譜（SIMS），電感耦合等離子體質譜（ICP-MS）等。

【0260】 在一些實施方案中，沒有現場實施的技術診斷能夠測量 LaB_6 的硼同位素組成，此時需要將樣品發送到協力廠商診斷實驗室分析。

【0261】 由於該化合物的陶瓷性質，它非常脆，並且極易受到熱應力的影響。在反應器內發生的不穩定反應，以及在諸如中心電極和護罩的各部件中存在的快速加熱和冷卻，可導致 LaB_6 的結構完整性被破壞。在反應器的若干實施方案中已經觀察到 LaB_6 燃料將隨著時間推移可能會破裂，因此有更換的需要。

【0262】 用於確定六硼化鏷燃料的結構完整性（及消耗）的一種可現場實施的診斷是目視檢查。控制軟體設置中的某些報警設置表示需要對六硼化鏷進行目視檢查。因為聚變反應發生在六硼化鏷所在的位置，所以從這些位置提取整個輸出功率（由控制軟體測量）。如果反應器的穩態電源功率輸出下降超過20%，則表明其中一個六硼化鏷片可能出現了問題觸發軟體上的電源指示器報警。這種類型的報警器表示需要對六硼化鏷件進行目視檢查。

【0263】 如本文所述，反應器以一種或多種形式產生能量；通常同時產生多種形式的能量。在運行時，大多數反應堆產生熱能。還可以在寬頻或窄頻範圍內產生輻射能量。例如，反應器內的激發物質（例如，電子激發的氫原子）在一個或多個頻帶中產生輻射。通常，反應器以需要等離子體和/或產生等離子體的模式操作，等離子體存在時，其產生輻射能

量。此外，許多反應產生具有高動能的帶電物質（例如，諸如 α 粒子等離子）。反應器還可以通過壓力變化或振盪產生機械能。

【0264】 可以將這些能量形式中的任何一種或多種轉換成可用于特定應用的不同能量形式。因此，在某些實施方案中，能量轉化裝置或元件與反應器相連。在一些設計中，能量轉換裝置將來自反應器的熱能轉換成電能（例如，熱電裝置）。在一些設計中，能量轉換裝置將來自反應器的熱能轉換成機械能（例如，熱力發動機）。在一些設計中，能量轉換裝置將來自反應器的電磁輻射轉換成電能（例如，光伏裝置）。在一些設計中，能量轉換裝置將帶電反應產物（例如， α 粒子）或電離的聚變反應物（例如質子）的動能轉換成電能。在一些設計中，能量轉換裝置將來自反應器的機械能轉換成電能（例如，壓電裝置）。

【0265】 可以使用各種能量轉換裝置將反應器產生的熱能轉換成機械和/或電能。例如，熱電發電機可以熱耦合到反應器以產生電能。熱電發電機可以通過如放置在約束壁上或者通過熱傳遞裝置（例如熱管）輸送來自反應器的熱能。在另一個示例中，反應器可以經由熱力發動機將熱能轉換成機械能（例如，移動活塞或旋轉曲軸）。在一些實施方案中，反應器配備有史特靈發動機。在一些實施方案中，反應器可配備有熱機，例如使用朗肯迴圈的熱機，其中工作流體經歷迴圈相變。如果需要電能，則熱機可配置有發電機，將旋轉曲軸或擺動活塞轉換成電能。

【0266】 一些能量轉換裝置可將由反應器產生的電磁輻射或輻射能轉換成電能。例如，可在反應器約束區域的一端上裝光伏電池，以將輻射能轉換成電能。在一些設計中，反應器可包括透明屏障以提供熱保護和/或光學裝置以將輻射能量集中到光伏電池上。在一些設計中，可以協調光

伏電池到同反應器發射的輻射能的窄帶波長（例如，對應於氫）的協調能隙。

【0267】 反應器還可以配置有將反應器產生的帶電粒子的動能轉換成電能的元件。例如，可以迫使帶正電的粒子（例如 α 粒子）穿過由一個或多個電極產生的反向電場，從而使之減速。隨著顆粒減速，連接到帶正電的電極電路中產生電流。在一些設計中，從反應器發射的 α 粒子可以通過施加的磁場導向這些電極。在一些設計中，反應器可連接磁流體動力發生器（MHD發生器），將聚變反應產生的等離子體的動能轉換成電能。

【0268】 在一些設計中，反應器可使用單個能量轉換裝置（或能量轉換模組）將由反應器產生的能量轉換成機械能和/或電能。在一些實施方案中，反應器可以使用多個能量轉換裝置（或能量轉換模組）將由反應器產生的能量轉換成機械能和/或電能。由於反應器可以產生多種形式的能量，因此可以組合不同類型的能量轉換裝置以增加產生的總機械和/或電能。在一些設計中，添加第二能量轉換裝置可能不會降低第一能量轉換裝置的能量輸出，因為不同裝置轉換不同形式的能量。例如，在一些實施例中，反應器可以從轉換輻射能量的光伏電池和轉換熱能的熱電發電機產生電能。在該實施例中，光伏電池的存在可能不會減少由熱電發電機產生的電能，反之亦然。在一些實施方案中，反應器可以配備有多個能量轉換裝置轉換相同類型的能量。例如，在一些設計中，反應器可以配備有史特靈發動機以及熱電發電機，兩者都利用熱能。在該示例中，熱電發電機可以捕獲史特靈發動機未轉換成機械和/或電能的熱能。總之，本文描述的能量轉換裝置或模組的任何組合可用於產生機械和/或電能。

外殼

【0269】 儘管未示出，反應器可以包括將環形區域與周圍環境隔開的外殼。在一些設計中，外殼的尺寸部分取決於約束壁的外部尺寸。在一些實施例中，約束壁在 r 方向上限定外殼的邊界，約束壁的兩端在 z 方向上的凸緣將環形區域與外部環境隔離。在一些實施例中，包括控制系統，電源，磁體和能量轉換裝置的整個系統被放置在外殼內。外殼的材料選擇取決於外殼的用途。例如，可能需要外殼來提供生物遮罩，熱隔離和/或實現低壓操作條件。在一些設計中，外殼可以具有分層結構，其中每層提供不同的功能。例如，外殼可以包括用於生物遮罩的烴材料和提供熱絕緣的陶瓷層。在某些設計中，可能會使用多個外殼。例如，第一外殼可以包括在 z 方向上密封環形區域的凸緣，從而產生真空室，而第二層外殼包圍整個反應器。基於本文提供的公開和教導，本領域普通技術人員將知道建造滿足反應堆應用的外殼的方式和/或方法。

程式條件

多級操作或反應

【0270】 在某些設計中，當多級運行時，反應器的能量輸出和效率得到改善。在一些設計中，反應器可以具有一個或多個預備階段，使反應器內的條件可以發生聚變反應。例如，多級過程中的準備階段可用于增加電子發射器的溫度，冷卻約束壁的溫度，在環形區域內產生等離子體，或改變環形區域內的氣壓。圖25描繪了可用於操作反應堆的多級流程圖示。在第一次運行中，2501，電子發射器被加熱直到達到發射電子的溫度。在2501中加熱電子發射體之後，在反應器的電極之間施加交流電以產生弱電離等離子體。

【0271】 在環狀區域中激發等離子體之後，反應器可以立即轉變到

旋轉帶電粒子的階段並維持聚變反應。在一些勞倫絲轉體中，施加均勻的磁場同時將直流電施加到電極商。或者，其中在z方向上施加交變磁場的實施例中，意味著以與磁場振盪相同的頻率向電極施加交流電流。在一些設計中，可以通過將交變電流施加到電磁體（例如超導磁體）或物理移動的永磁體來施加交變磁場，例如在環形區域的任一側上安裝磁體的轉體。在某些設計中，通過以相同的頻率交替電場和磁場，使電中性粒子和帶電粒子的旋轉保持在相同的方向。例如，在一些設計中，電場和磁場可以以約0.1赫至10赫之間的頻率振盪，在某些情況約10赫至約1千赫，在一些設計中大於千赫。

【0272】在波粒實施例中，可以將電信號有序施加到與環形區域外沿的電極，使粒子開始旋轉。如，驅動信號可以以低頻率啟動，例如，大約60赫，然後上升到高頻，例如約10百萬赫。在一些設計中，反有類似的終止聚變反應的多級方法。在一些設計中，反應器具有在聚變反應停止然後恢復之間的空閒操作階段。在反應器運行期間，可以密切監測參數。在利用勞倫絲力旋轉電荷的反應器中，約束壁附近的環形區域中的電流密度約為150安/平方米至約10千安/平方米，如約為150安/平方米到9千安/平方米。在一些設計中，約束壁附近的電流密度約為150安/平方米至約700千安/平方米。還有一些情況，約束壁附近的電流密度約為400安/平方米至約6000千安/平方米。在一些設計中，在約束壁附近保持足夠強的電場運行反應器。例如，在一些設計中，電場大於約25伏/米，在一些設計中大於約40伏/米，在某些設計中大於約30伏/米。

【0273】在一些多級操作中，反應器可以週期性地交替帶電粒子旋轉的方向。在一些設計中，通過交替帶電粒子旋轉的方向，可以增加兩個

旋轉的聚變反應物之間的碰撞幾率。在一些設計中，可以交替旋轉方向以增加或控制反應器中的聚變速率。在一些實施例中，通過交替旋轉方向，使聚變反應發生在環形空間內而不是在限制表面上，從而減小約束壁上的聚變反應率。如果約束壁變得太熱，這可能有益於減少約束壁的熱量。在勞倫絲轉體的設計中，旋轉方向可以通過變化交替施加的電場和/或磁場而交替。例如，如果在保持電場的同時交替磁場，則帶電粒子上的勞倫絲力也將交替方向。在一些設計中，施加的電場和施加的磁場以約0.1Hz至約10Hz之間的頻率交替，在一些設計中約為10Hz至約1kHz，在一些設計中大於約1kHz。這可能有助於將電子集中在富電子區域，使旋轉粒子集中在非常接近的位置，且在一些設計中，增加聚變反應的數量。

氣體條件

【0274】 在將氣體引入約束區域的設計中，例如，在氫氣或氦氣反應氣體中，具有一定純度的反應氣體可能是有益的。在一些設計中，反應氣體體積中的雜質可降低反應速率和總能量輸出。在反應物氣體容易以純淨形式獲得的設計中，反應物氣體純度至少約99.95體積%到99.999體積%。也就是說反應器中的雜質少於10每百萬體積。

【0275】 在一些設計中，可能在氫反應氣體中發現氘——一種天然存在的氫同位素。例如，在氫氣罐可能有含氘的雜質，因此，當在反應氣體中大量存在時，會有潛在的危險。如果燃料中存在過多的氘，則在反應器內可能發生除質子 - 硼11以外的聚變反應。在某些設計中，這些其他反應可能會釋放放射性副產物。為了監測反應氣體中的氘的量，反應器可以配備有感測器，例如，使用原位質譜儀(例如Hiden Analytical的殘餘氣體分析儀，用於監測氫反應氣體中的氘的量。

【0276】反應器可含有離子比電中性粒子的摩爾分數，接近0%。在擊穿等離子體之後，反應器中旋轉物質中離子與電中性粒子的摩爾分數約為1:1000至約1:1,000,000。在一些設計中，反應氣體中離子與電中性粒子的摩爾分數會隨著多級工藝流程的特定階段而變化。例如，圖25所示流程中，啟動等離子體之後的階段2502中，離子與電中性粒子的摩爾分數可能比反應器在穩定狀態下操作的2503階段更高。

【0277】如其他地方所述，反應器配有氣體入口和出口閥。原則上，可以控制通過進氣閥和/或氣體出口閥的流量，以在約束區域內保持所需的氣體組成或氣體壓力。、在一些設計中，約束區域中的氣體體積可以小於大約每分鐘一次或大約每小時一次的速率替換。在許多實施例中，氣閥可以是密封的，因此在反應器運行期間沒有流體流動。

【0278】在一些設計中，在約束區域中產生等離子體之前，將反應氣體保持在標準溫度和壓力下。在某些設計中，例如當使用真空外殼時，可以使用真空泵將壓力降低至小於約 1×10^{-2} 托，在另一些設計中，在擊穿等離子體之前約束區域小於約 1×10^{-6} 托。在一些設計中，為了增加電中性物質的密度，反應物進氣管在擊穿等離子體前或在操作期間在約束區域中將內部壓力增加至大於約0.1托，在另一些設計中大於約10托。在反應器運行期間，顆粒會受到向心加速度，該向心加速度是地球表面上重力加速度的十億倍。在一些設計中，可以在反應器的操作期間監測約束壁周圍的氣體壓力和/或密度。如果在約束壁附近引起旋轉物質的壓力不足，則富電子區域可以進一步擴散到約束區域中且不能提供所需的電子遮罩效果。在某些設計中，可以即時監測約束壁附近的氣體壓力。在產生等離子體之前，氣體的溫度可能接近室溫，在一些設計中，先加熱氣體。在一些設計

中，將氣體加熱至大於約1,80攝氏度，在另一些設計中，將氣體加熱至大於約2,200攝氏度。在反應器的穩定操作期間，可以加熱氣體溫度，使得約束區域中的氣體在約400攝氏度至約800攝氏度的範圍內，在一些設計中在約900攝氏度至約1,500攝氏度的範圍內。

【0279】 如在別處所討論的，可以通過各種機制將反應氣體輸送到反應器中。在使用進給閥的設計中，可以從氣罐或加壓罐輸送氣體反應物。在一些實施例中，例如氫的反應氣體可以通過從約束壁或諸如鈦或鈹的吸氫材料中擴散到約束區域中。

降低庫倫障壁的操作條件

【0280】 如本文其他地方所述，每單位時間單位體積的聚變速率可以表示為：

$$\text{【0281】 } dN/dT = n_1 n_2 \sigma v$$

【0282】 其中 n_1 和 n_2 是各反應物的密度， σ 是特定能量下的反應截面， v 是兩個相互作用物質之間的相對速度。可以通過降低庫倫障壁來增加乘積（ σv ）。在一些設計中，反應橫截面可以在約 10^{-30} 平方釐米和約 10^{-48} 平方釐米之間，在另一些設計中，約為 10^{-28} 平方釐米和約 10^{-24} 平方釐米。在一些設計中，相對速度在 10^4 米/秒和 10^6 米/秒之間，在另一些設計中約為 10^3 米/秒和約 10^4 米/秒之間。在一些設計中，庫倫障壁的減少可導致沿著約束壁的聚變反應的反應速率達到約每秒每立方釐米 10^{17} 至 10^{22} 次。

【0283】 如在別處所討論的，可以在約束壁附近形成富電子區域，以在碰撞的聚變核之間提供遮罩效應。在一些設計中，電子發射器可用于向該區域提供自由電子。可以通過光學（例如，使用鐳射）、旋轉顆粒的

摩擦加熱和/或通過焦耳加熱來激勵電子發射器。

【0284】 在富電子區域內，電子密度可以在約 10^{10} 至約 10^{23} 每立方釐米的範圍內，在一些設計中，電子密度在約 10^{23} 每立方釐米的數量級。在一些實施方案中，富電子區域中的電中性物質密度可以約 10^{16} 到 10^{18} 每立方釐米的範圍內，在另一些設計中，約束區域內的電中性物質密度為約 10^{20} 每立方釐米的數量級。正離子的密度比富電子區域內的電中性粒子密度低得多。在一些設計中，正離子的密度為約 10^{15} 每立方釐米至約 10^{16} 每立方釐米。在一些設計中，富電子區域內的電子與正離子的比率在約 $10^6 : 1$ 至約 $10^8 : 1$ 。

【0285】 富電子區域的徑向厚度可以描述為存在最大電子梯度的區域。在一些設計中，富電子區域大小約在50納米至約50微米的範圍內，在一些設計中，富電子的區域為約500納米至約1.5微米。

【0286】 在富電子區域內，例如，距離約束壁約1微米處，可能存在強電場。在一些設計中，富電子區域（或約束區域）內的電場強度大於 10^6 伏/米，在另一些設計中，電場大於約 10^8 伏/米。在某些設計中，該區域中的電子溫度為約10,000克耳文至約50,000克耳文，在另一些設計中為約15,000克耳文至約40,000克耳文。

【0287】 在一些設計中，如果一個參數受到物理限制的約束，則該參數可能最終影響富電子區域內的其他參數。如，Lawson標準涉及參數的平衡。

【0288】 在一些設計中，富電子區域的參數可部分取決於靶向的聚變反應。例如，參數範圍在 $p + 11B$ 反應與 $D + D$ 反應中是不同的。

【0289】 增加聚變事件概率的另一種方法是通過聚變反應物的自旋

定向。核力有自旋依持的屬性。當自旋校直時，在兩個聚變核之間（例如氘核和氚核的核之間）庫侖障壁減小。核磁矩在量子隧穿中起作用。具體來講，當兩個聚變核的磁矩平行時，它們之間的產生吸引力。結果，具有平行磁矩的兩個核之間的總障壁降低，並更可能發生穿隧事件。相反，當兩個聚變核具有反向平行磁矩時，障壁增加，並且不太可能發生隧道效應。當特定類型的核的磁矩為正時，聚變核傾向於在施加的磁場方向上校直。相反，當力矩為負時，聚變核傾向於與反向平行於施加的場校直。作為潛在聚變反應物的大多數聚變核，具有正磁矩（ p ， D ， T ， ${}^6\text{Li}$ ， ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^{11}\text{B}$ 都具有正磁矩； ${}^3\text{He}$ 和 ${}^{15}\text{N}$ 具有磁矩）。在某些實施例中，在裝置內的每個點處沿大致對準磁矩的方向提供磁場。當第一和第二工作材料具有同正磁性或同負磁力矩時，這導致核之間的總能障壁減小。據信這導致穿隧概率和聚變反應發生率增加。該效應也可以稱為自旋極化或磁偶極 - 偶極相互作用。另外，聚變核圍繞磁場線的回轉也有助於確定核的總角動量。因此，當聚變核的迴旋運動在相同方向上產生額外的角動量時，庫侖障壁進一步減小。

【0290】 在一些設計中，可以通過施加1到20特斯拉範圍內的磁場來校直約束區域內和沿著約束壁的聚變反應物（例如， ${}^1\text{H}$ 和 ${}^{11}\text{B}$ ）的自旋狀態。在使用磁場提供勞倫絲力的實施例中，磁場也可以校直聚變反應物的自旋狀態。通過電子遮罩和自旋極化（通過作用在反應物聚變核上的強磁場實現）的組合減少庫侖障壁，可以使聚變反應率顯著增強。兩個核之間的靜電吸引包含自旋依賴期間，其在短距離（例如，小於1 fm）占主導地位。

應用

【0291】 本文所述的聚變反應器具有豐富的應用，可以解決許多社會問題，包括諸如對化石燃料的依賴。在一些設計中，使用聚變反應器可以製造可行的和/或實際的能量密集型應用，這些應用在傳統的發電方法是不可行或不實用的。現在簡要討論一些聚變反應器的應用。

【0292】 在一些設計中，聚變反應器可用於改造化石燃料發電廠，例如燃燒煤、天然氣或石油的發電廠。在一些設計中，本文所述的聚變反應器可用於改造裂變發電廠。在某些設計中，改造發電廠時，可能僅需要更換或更新發電廠中產生能量的部分。因而發電廠改造簡單且低成本，因為渦輪機、發電機、冷卻塔，到配電網路的連接部分以及其他基礎設施可以被重複使用。例如，可以通過利用本文所述的反應器容器代替燃煤鍋爐來改造煤電廠。類似地，可以通過用本文所述的聚變反應器替換控制棒和鈾燃料來改造核裂變發電廠。

【0293】 在一些設計中，聚變反應堆採用多個較小反應器的模組化設計。通過具有多個反應器，可以通過改變運行的反應器數量來調節設備的輸出功率以滿足能量需求。另外，如果在其他反應器保持可操作的同時可以維修或更換單個反應器，則工廠的總功率輸出可能不會受到顯著影響。

【0294】 在一些設計中，聚變反應器可以用作工業（例如玻璃纖維製造）熱源。在一些設計中，反應器被配置為蒸汽發生器（例如，用於蒸汽清潔或金屬切割的蒸汽發生器）的熱源。在一些設計中，反應器的聚變反應產生氦作為氦源（例如，當反應器進行質子 - 硼-11聚變時）。在一些設計中，反應器可以用作熱水器的一部分，如家用熱水器。例如，反應器可以放置在水箱內，或者可以熱耦合到水箱，從反應器發出的熱量用於

加熱水。在一些設計中，基於聚變反應的熱水器可以與水散熱器一起使用作為室內供暖。

【0295】 在一些設計中，聚變反應器用於運輸領域應用。例如，聚變反應堆可用於汽車、飛機、火車和船舶。例如，汽車可以配備有一個或多個含有能量轉換模組的反應器，以產生電能和/或機械能。在電動汽車中，由反應器產生的電能可用於給電池或電容器充電，該電池或電容器向電動機提供電力。例如，每當電池的充電狀態下降到某個閾值以下時，可以操作反應器對電池充電。在一些設計中，可以由包括史特靈發動機在內的裝置產生機械能，該史特靈發動機為汽車提供驅動動力。在一些設計中，聚變反應堆可用于向外太空飛行器提供動力。外太空飛行器的一些設計使用裂變反應堆，例如放射性同位素熱電發電機。這種設計備受使用和產生放射性同位素的困擾。它們還需要攜帶相對大量的放射性燃料。由於本文描述的反應器是空無中子的或基本上是無中子的，因此這些反應器對於載人航天器可能更加優選。另外，本文所述反應器產生相同量的能量的能量密度顯著高於裂變反應或化學反應所需的燃料。

【0296】 不使用“裝置”或“步驟”的權利要求不是“裝置加功能”或“步驟加功能”的形式。（參見35USC§112（f））。申請人的意圖是，只有使用“方法”或“步驟”的要求根據或根據35 U.S.C§112（f）進行解釋。

【0297】 在不脫離本發明的精神或基本特徵的設計中，本公開可以以其他特定形式實施。所描述的實施例在所有方面都應被視為僅是說明性的而非限制性的。因此，本公開的範圍由所附權利要求而不是前面的說明表示。在權利要求的含義和範圍內的所有可能的實施方案都應被視為包含在內。

【符號說明】

【0298】

110	外部電極
112	內部電極
120	內部電極
122	外部電極
140	環形空間
142	間隙
144	電場
146	磁場
204	帶電粒子
206	中性粒子
210	約束壁
232	富電子區
412	約束壁
432	電子富集區域
482	階段
483	階段
484	階段
485	階段
502	拉莫爾 (Larmor) 半徑
503	路徑
510	外部電極

520	內部電極
520a	導電芯
520b	靶材料
532	富電子區
540	環形區域
542	間隙
544	電場
546	磁場
616	外環磁體
626	內環磁體
640	環形空間
658	北極
659	南極
660a	電極
660b	電極
704	離子
714	電極
724	內部電極
740	環形空間
810	外部電極
820	內部電極
842	間隙
910	外部電極

912	表面
920	內部電極
922	表面
1010	外部電極
1020	內部電極
1040	環形空間
1054	超導線圈繞組
1056	外殼
1110	外部電極
1112	約束壁
1120	內部電極
1140	環形空間
1150	磁體
1201	放大視圖
1210	外部電極
1212	內表面
1220	內部電極
1240	環狀空間
1250	永磁體
1300	反應器
1310	外部電極
1312	約束壁
1320	內部電極

1340	環形空間
1350	磁體
1400	反應器結構
1410	外部電極
1412	約束壁
1420	內部電極
1440	環狀空間
1450	永磁體
1545	磁場
1546	磁場
1550	磁場
1610	外部電極
1612	約束壁
1620	內部電極
1640	環狀空間
1650	磁體
1710	外部電極
1712	約束壁
1720	內部電極
1740	環形區域
1750	磁體
1752	磁體
1810	外部電極

1812	約束壁
1820	內部電極
1840	環狀空間
1854	線圈繞組
1910	內部電極
1920	內部電極
1921	套筒
1923	陶瓷塊
1928	內部通路
2010	約束壁
2036	電子發射器
2110	外部電極
2112	約束壁
2120	內部電極
2130	電子發射體材料
2134	燈絲
2135	電源
2136	電子發射裝置
2137	絕緣層
2138	絕緣層
2140	環形區域
2200	反應器
2220	內部電極

2230	電子發射器
2231	雷射器
2239	絕緣光纖
2240	環形區域
2310	外部電極
2320	內部電極
2390	檢測線圈
2391	磁場
2392	時變磁場
2460	感測器
2461	信號
2462	控制系統
2463	信號
2464	反應器
2501	階段
2502	階段
2503	階段

【發明摘要】**【中文發明名稱】**

減少相互作用反應物間庫侖障壁的技术方案

【英文發明名稱】

REDUCING THE COULOMBIC BARRIER TO INTERACTING
REACTANTS

【中文】

用於產生和控制核聚變反應的方法，裝置，設備和系統。離子由電場和磁場驅動，且由於離子和中性粒子耦合，氫原子或其他中性物質（中性粒子）在約束區域發生旋轉。可控聚變反應包含一系列反應，包括諸如質子-硼-11聚變反應的不產生中子的反應。

【英文】

Methods, apparatuses, devices, and systems for producing and controlling and fusion activities of nuclei. Hydrogen atoms or other neutral species (neutrals) are induced to rotational motion in a confinement region as a result of ion-neutral coupling, in which ions are driven by electric and magnetic fields. The controlled fusion activities cover a spectrum of reactions including aneutronic reactions such as proton-boron-11 fusion reactions.

【指定代表圖】

圖21a

【代表圖之符號簡單說明】

2110 外部電極

- 2120 內部電極
- 2136 電子發射裝置
- 2140 環形區域

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種裝置，包括：

(a) 反應器，包括：

至少部分地圍成約束區域的約束壁，帶電粒子和中性粒子在該約束區域內旋轉；

鄰近或靠近所述約束區域的多個電極；

控制系統，包括電壓源和/或電流源，被配置為在所述多個電極中的至少兩個電極之間施加電勢，其中所施加的電勢單獨或者與磁場一起在所述約束區域內產生電場，驅動和/或維持所述約束區域內的所述帶電粒子和所述中性粒子的旋轉運動，和

設置在所述約束區域中或鄰近所述約束區域的反應物，在運行期間，所述中性粒子和該反應物之間的反復碰撞產生與該反應物的相互作用，該相互作用釋放能量並產生具有不同於中性粒子原子核和反應物的原子核核品質的產物，其中所述富電子區域中電子數目比帶正電粒子數目至少高出約 10^6 /立方釐米。

【第2項】

根據權利要求1所述的反應器，其特徵在於，所述多個電極圍繞所述約束區域沿方位角分佈，並且其中所述控制系統通過向所述多個電極施加時變電壓來引起所述帶電粒子和所述電中性物質在所述約束區域中的旋轉。

【第3項】

根據權利要求1或2所述的反應器，其中所述反應器配置成通過所述電

場與所述約束區域內施加的磁場之間的相互作用引起所述受限區域中的帶電粒子和所述電中性粒子的旋轉。

【第4項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，在操作期間，所述富電子區域內的電子與正離子的比率在約 10^6 ：1和 10^8 ：1之間。

【第5項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中，在所述反應器的操作期間，富電子區域具有至少約 10^6 伏/米的電場強度。

【第6項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中，在操作期間，所述富電子區域中的電子的平均溫度為約10,000克耳文至50,000克耳文。

【第7項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中，在所述反應器的操作期間，富電子區域中的中性物質的平均能量約為0.1eV和2eV之間。

【第8項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中，在所述反應器的操作期間，所述富電子區域中的電子密度為約 10^{10} 每立方釐米至約 10^{23} 每立方釐米。

【第9項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中，在所述反應器的操作期間，所述富電子區域從所述約束壁延伸到所述約束區域中的距離為約50納米至約50微米。

【第10項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中，在反應器運行期間，靠近反應物的約束區域中的中性物質的密度至少為約 $10^{16} / \text{cm}^3$ 。

【第11項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中在反應器操作期間，靠近反應物的約束區域中的中性物質的密度約為 10^{16} 至約 10^{18} 每立方釐米。

【第12項】

根據上述任一項權利要求所述的反應器，其中所述反應器包括設置在所述約束區域中或與所述約束區域相鄰的電子發射器，使得在操作期間，所述電子發射器在所述約束區域中產生電子。

【第13項】

根據權利要求12所述的反應器，其中所述電子發射器附接到或嵌入所述約束壁中。

【第14項】

根據權利要求13或14所述的反應器，包括插入在所述約束壁和所述發射器之間的一個或多個絕緣層，所述絕緣層提供絕熱和/或電絕緣。

【第15項】

根據權利要求14所述的反應器，其中所述一個或多個絕緣層由氧化鋯，氧化鋁，氮化鋅和氧化鎂中的任意一者或其組合形成。

【第16項】

根據權利要求12-15中任一項所述的反應器，其中所述電子發射器的至少一個幾何端點凸起到所述約束區域中。

【第17項】

根據權利要求12-16中任一項所述的反應器，包括與所述電子發射器熱連通的燈絲，其中所述控制系統還被配置為通過所述燈絲向電子發射器施加電流。

【第18項】

根據權利要求17所述的反應器，包括溫度感測器，所述溫度感測器被配置為監測所述電子發射器的溫度，其中所述控制系統被配置為依據所監測的溫度將電流施加到所述燈絲。

【第19項】

根據權利要求12-18中任一項所述的反應器，包括雷射器，所述雷射器配置成通過所述約束區域發射鐳射到所述電子發射器或所述約束壁上，使得所述鐳射與所述電子發射器或所約束壁相互作用，電子被發射到約束區域。

【第20項】

根據權利要求12-19中任一項所述的反應器，在所述反應器的操作期間，所述電子發射器配置成移入和移出所述約束區域。

【第21項】

根據權利要求20所述的反應器，其中，所述控制系統被配置為控制所述電子發射器在所述約束區域內的移動。

【第22項】

根據權利要求21所述的反應器，還包括溫度感測器，所述溫度感測器被配置為監測所述電子發射器的溫度，其中所述控制系統被配置為基於所監測的溫度來控制所述電子發射器在所述約束區域內的移動。

【第23項】

如權利要求12-22中任一項所述的反應器，其中所述電子發射器包括硼或含硼的材料。

【第24項】

如前述權利要求中任一項所述的反應器，其中所述反應物包含硼-11。

【第25項】

根據前述權利要求中任一項所述的反應器，其中所述產物的原子核品質大於所述中性物質和所述反應物的原子核品質。

【第26項】

如前述權利要求中任一項所述的反應器，其中所述相互作用是聚變反應。

【第27項】

如權利要求36所述的裝置，其中所述聚變反應是無中子反應。

【第28項】

如前述權利要求中任一項所述的反應器，如權利要求23所述的方法，其中所述中性物質包括中性氫，氘和/或氚。

【第29項】

根據前述權利要求中任一項所述的反應器，包括能量轉換裝置，所述能量轉換裝置從所述反應器提取熱能，帶電反應產物的動能和/或機械能，並將所述熱能，動能和/或機械能轉換為可供在反應器外使用的電能和/或機械能。

【第30項】

一種操作反應器的方法，包括：

在反應器中的多個電極中的至少兩個之間施加電勢，包括：

約束壁，至少部分包圍約束區域，

多個電極，鄰近或靠近約束區域，

控制系統，包括電壓和/或電流源，被配置為在所述多個電極中的至少兩個電極之間施加電勢，其中所施加的電勢在所述約束區域內產生電場，和

設置在約束區域內或附近的反應物；

其中，約束區域中的電場單獨作用或與磁場一起作用，引起和/或保持帶電粒子和中性物質在約束區域內的旋轉運動；

其中，在反應器運行期間，約束區域內靠近所述約束壁的所述富電子區域中，電子數目比帶正電粒子數目至少高出約 10^6 / 立方釐米；和

其中，在反應器運行期間，中性物和反應物之間的反復碰撞產生反應物的相互作用，釋放能量並產生具有不同於任何中性物質原子核和反應物原子核品質的產物。

【第31項】

根據權利要求30所述的方法，其中所述多個電極在所述約束區域周圍沿方位角分佈，其中所述控制系統通過向所述多個電極施加時變電壓來引起所述帶電粒子和所述電中性物質在所述約束區域中的旋轉運動。

【第32項】

根據權利要求30所述的方法，其中，所述約束區域中的電場與所述磁場一起作用，引起和/或維持所述帶電粒子和所述中性粒子在所述約束區域

中的旋轉運動。

【第33項】

根據權利要求30-32中任一項所述的方法，其中，在所述反應器的操作期間，所述富電子區域內的電子與正離子的比率在約 $10^6:1$ 和 $10^8:1$ 之間。

【第34項】

根據權利要求30-33中任一項所述的方法，其中，在所述反應器的操作期間，富電子區域具有至少約 10^6 伏/米的電場強度。

【第35項】

根據權利要求30-34中任一項所述的方法，其中，在所述反應器的操作期間，富電子區域中的中性物質的平均能量約為0.1eV和2eV之間。

【第36項】

根據權利要求30-35中任一項所述的方法，其中，在所述反應器的操作期間，所述富電子區域中的電子密度為約 10^{10} 至約 10^{23} 每立方釐米。

【第37項】

根據權利要求30-36中任一項所述的方法，其中，在所述反應器的操作期間，所述富電子區域從所述約束壁延伸到所述約束區域中的距離為約50納米至約50微米。

【第38項】

權利要求30-37中任一項所述的方法，其中，在反應器運行期間，靠近反應物的約束區域中的中性物質的密度至少為約 $10^{16} / \text{cm}^3$ 。

【第39項】

權利要求30-38中任一項的方法，其中在反應器操作期間，靠近反應物

的約束區域中的中性物質的密度約為 10^{16} 至約 10^{18} 每立方釐米。

【第40項】

根據權利要求30-39中任一項所述的方法，其中所述反應器包括設置在所述約束區域中或與所述約束區域相鄰的電子發射器，使得在操作期間，所述電子發射器在所述約束區域中產生電子。

【第41項】

如權利要求40所述的方法，包括控制約束區域中電子的產生。

【第42項】

根據權利要求41所述的方法，其中控制所述約束區域中的電子的產生方法包括將電流施加到與所述電子發射器熱連通的燈絲。

【第43項】

如權利要求42所述的方法，包括監測電子發射器的溫度，並且施加到燈絲的電流基於監測的電子發射器的溫度。

【第44項】

根據權利要求41-43中任一項所述的方法，其中控制所述約束區域中的電子的產生的方法包括將所述電子發射器移入或移出所述約束區域。

【第45項】

如權利要求44所述的方法，還包括監測電子發射器的溫度，並且電子發射器進入或離開約束區域基於監測的電子發射器溫度。

【第46項】

根據權利要求41-45中任一項所述的方法，其中控制所述約束區域中的電子產生的方法包括控制雷射器的光發射，所述雷射器被配置為發射鐳射通

過所述約束區域到所述電子發射器或所述約束壁上。

【第47項】

如權利要求46所述的方法，還包括監測電子發射器的溫度，並且基於所監測的電子發射器溫度來控制雷射器。

【第48項】

如權利要求40-47中任一項所述的方法，其中所述電子發射器附著或嵌入所述約束壁中。

【第49項】

如權利要求40-48中任一項所述的方法，其中所述電子發射器包括硼或含硼的材料。

【第50項】

權利要求30-49中任一項的方法，其中反應物包含硼-11。

【第51項】

權利要求30-50中任一項的方法，其中所述產物的原子核品質大於所述中性物質和所述反應物的原子核品質。

【第52項】

權利要求30-51中任一項的方法，其中所述相互作用是聚變反應。

【第53項】

如權利要求52所述的方法，其中所述聚變反應是無中子反應。

【第54項】

如權利要求52所述的方法，其中所述所述富電子區域中聚變反應發生速率約 10^{17} 至約 10^{22} 每秒每立方釐米。

【第55項】

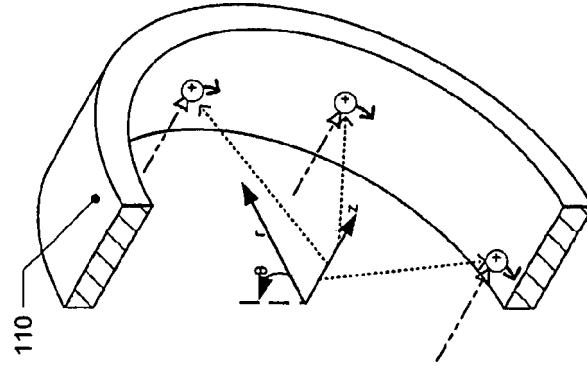
如權利要求30-54中任一項所述的方法，其中所述中性物質包括中性氫，氖和/或氬。

【第56項】

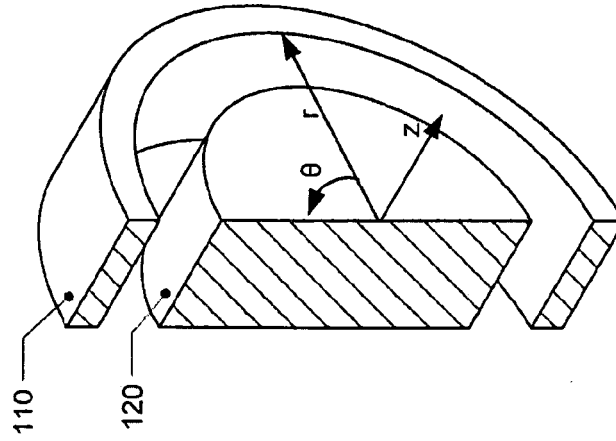
如權利要求30-55中任一項所述的方法，還包括將熱能，帶電反應產物的動能和/或來自反應器的機械能轉換成電能和/或機械能，輸出到反應器外。

【發明圖式】

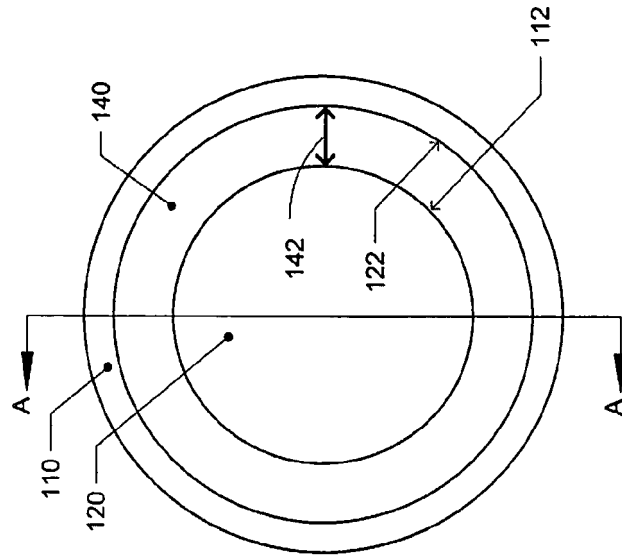
- 粒子洛倫磁力方向
- - - 146. 粒子磁場方向
- ⋯⋯ 144. 粒子電場方向



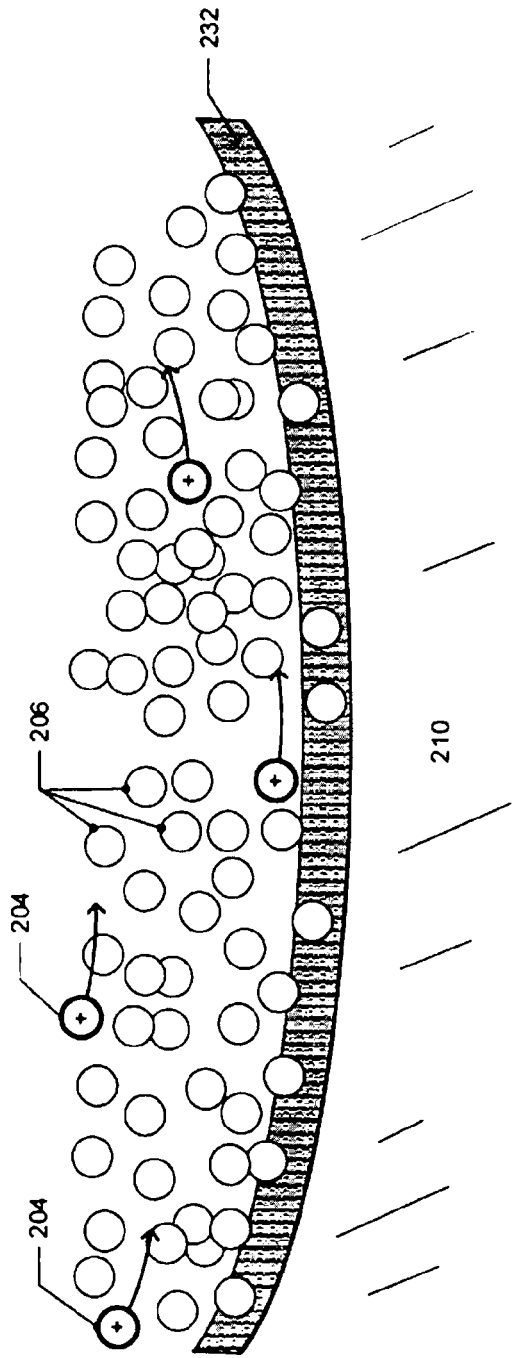
【圖 1c】



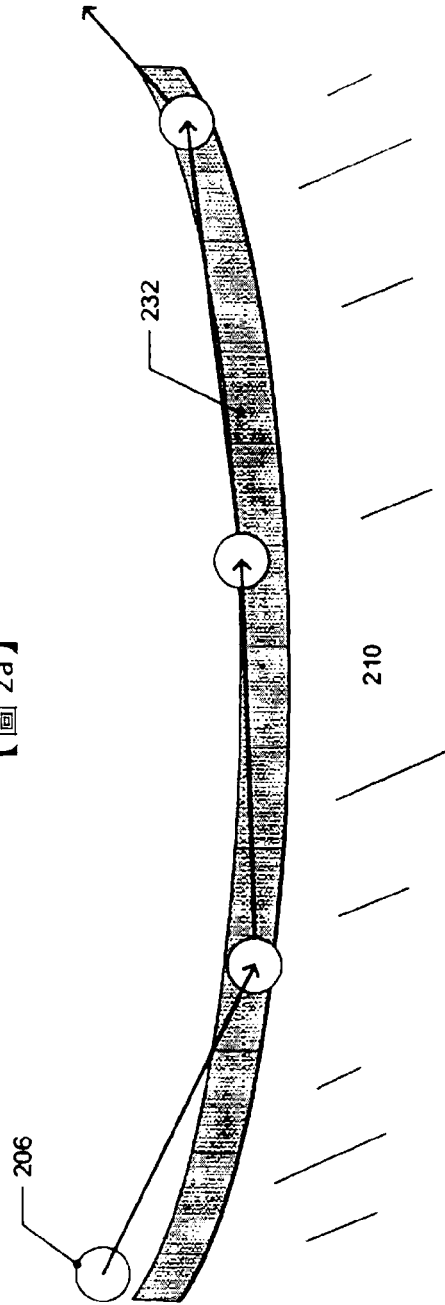
【圖 1b】



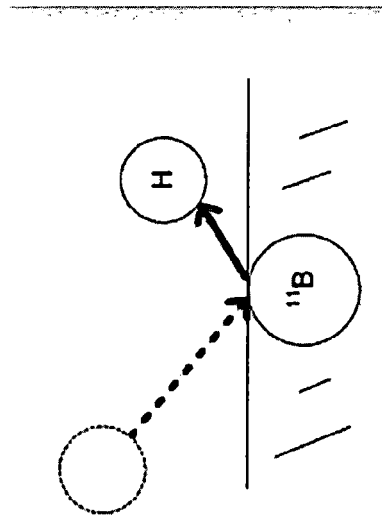
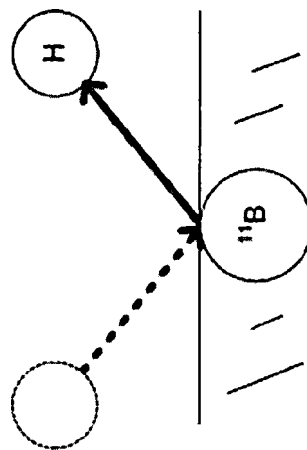
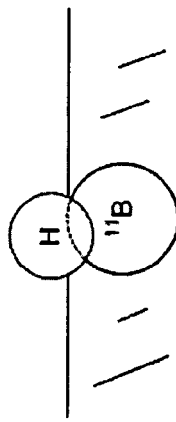
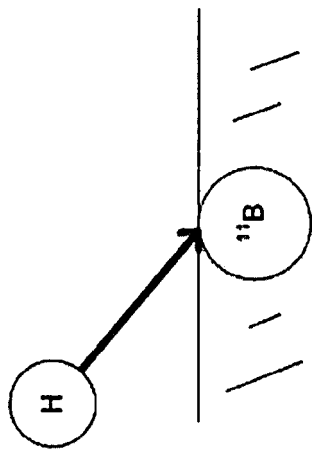
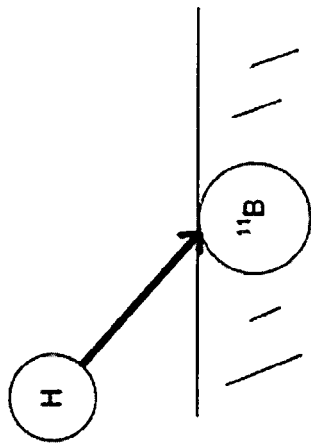
【圖 1a】



【圖 2a】

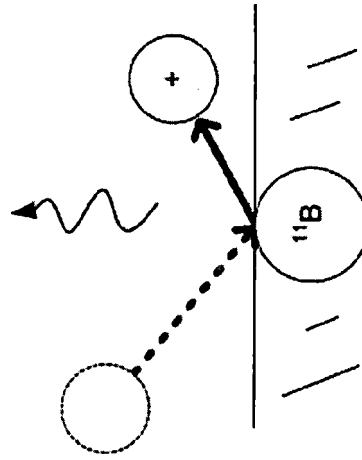
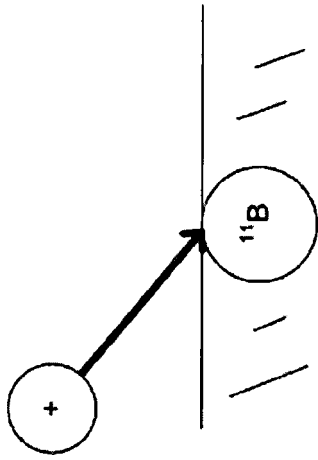


【圖 2b】

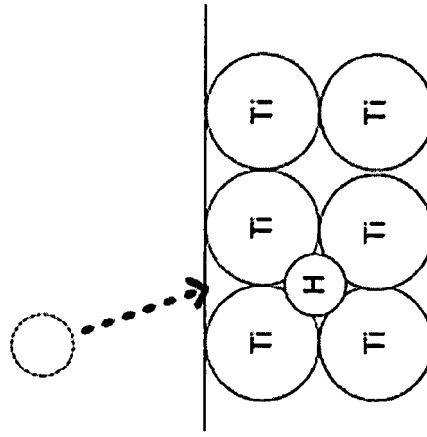
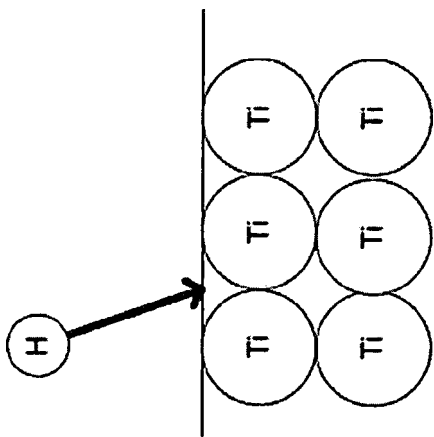


【圖 3b】

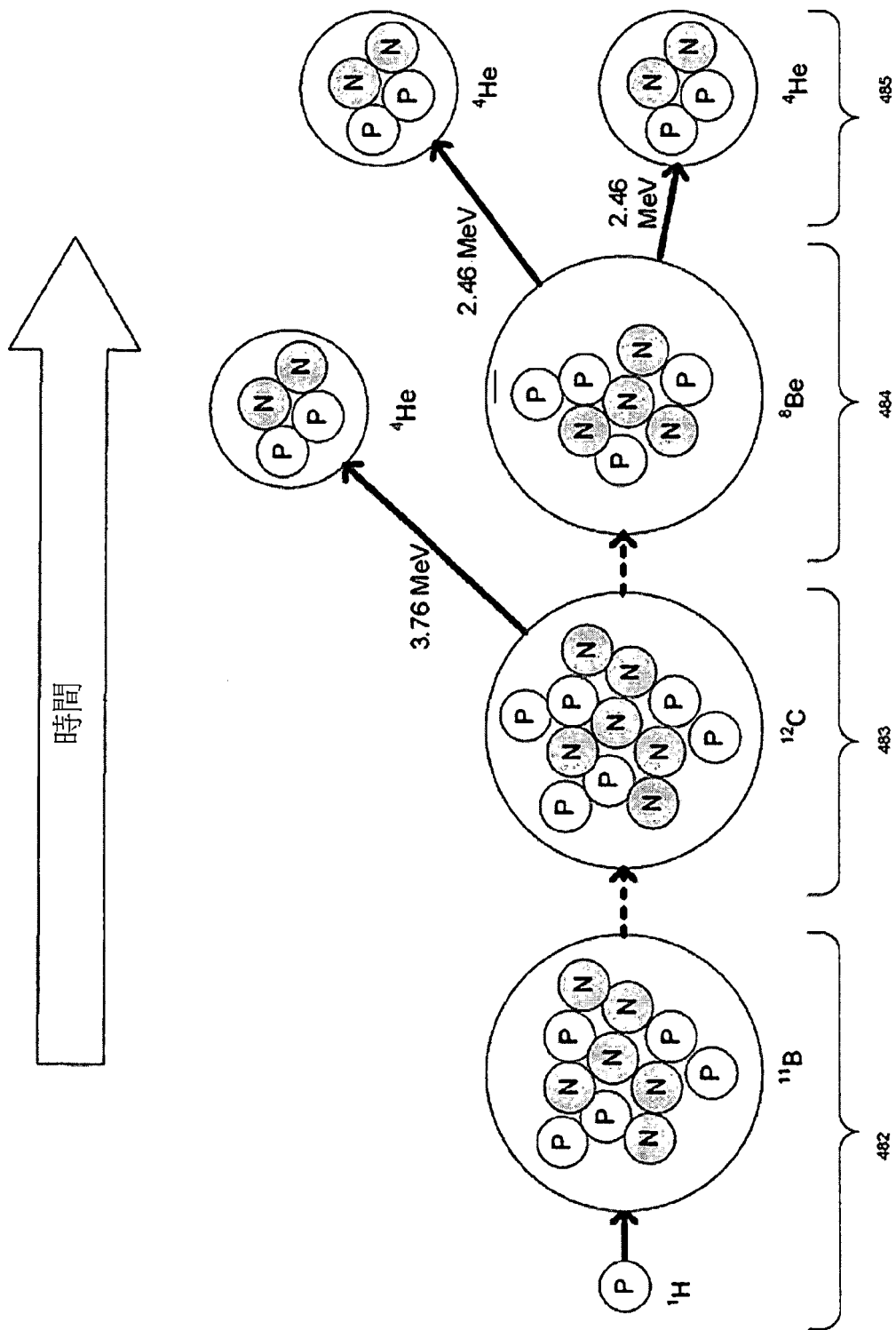
【圖 3a】



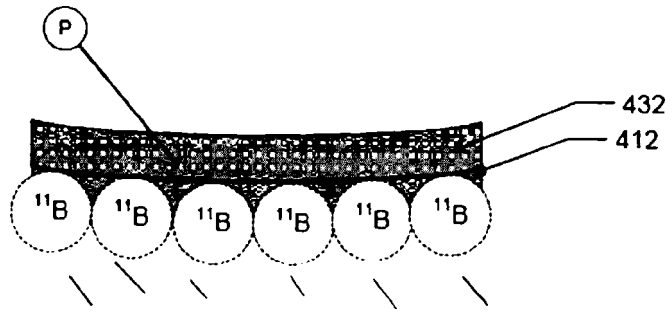
【圖 3d】



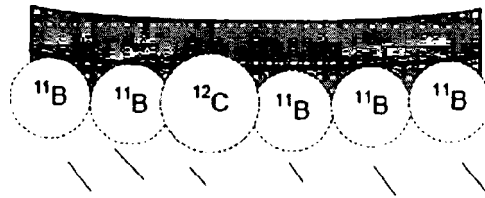
【圖 3c】



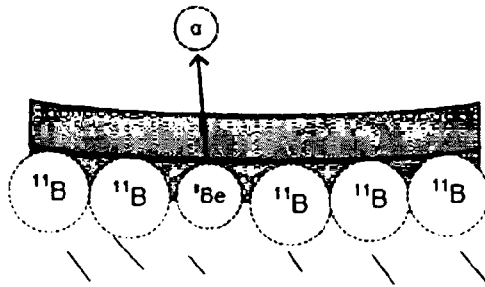
【圖 4a】



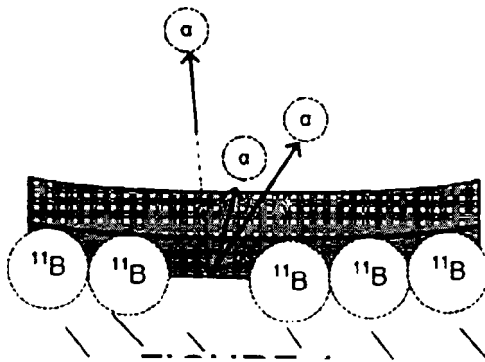
【圖 4b】



【圖 4c】

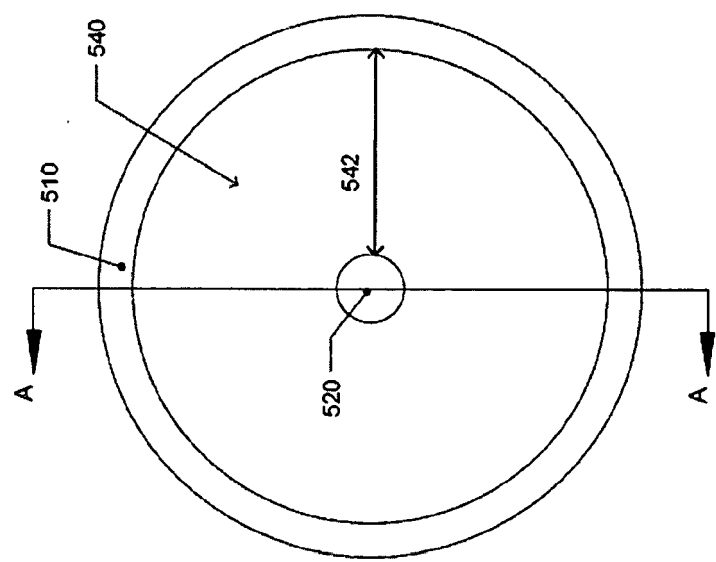


【圖 4d】

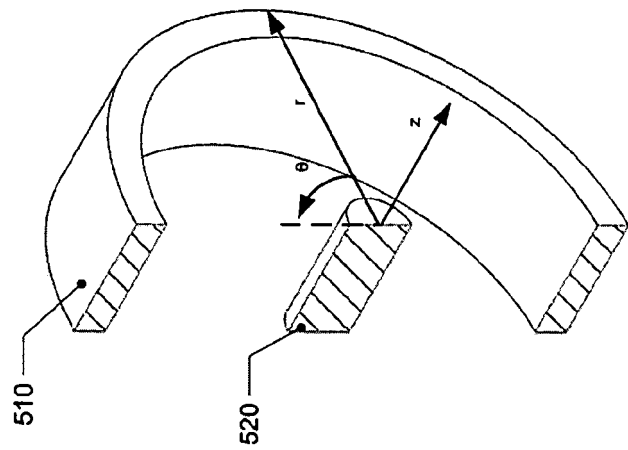


【圖 4e】

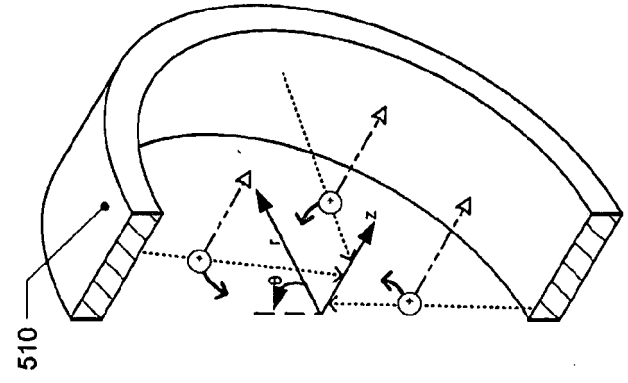
→ 粒子洛倫磁力方向
 - - - 546. 粒子磁場方向
 ····· 544. 粒子電場方向



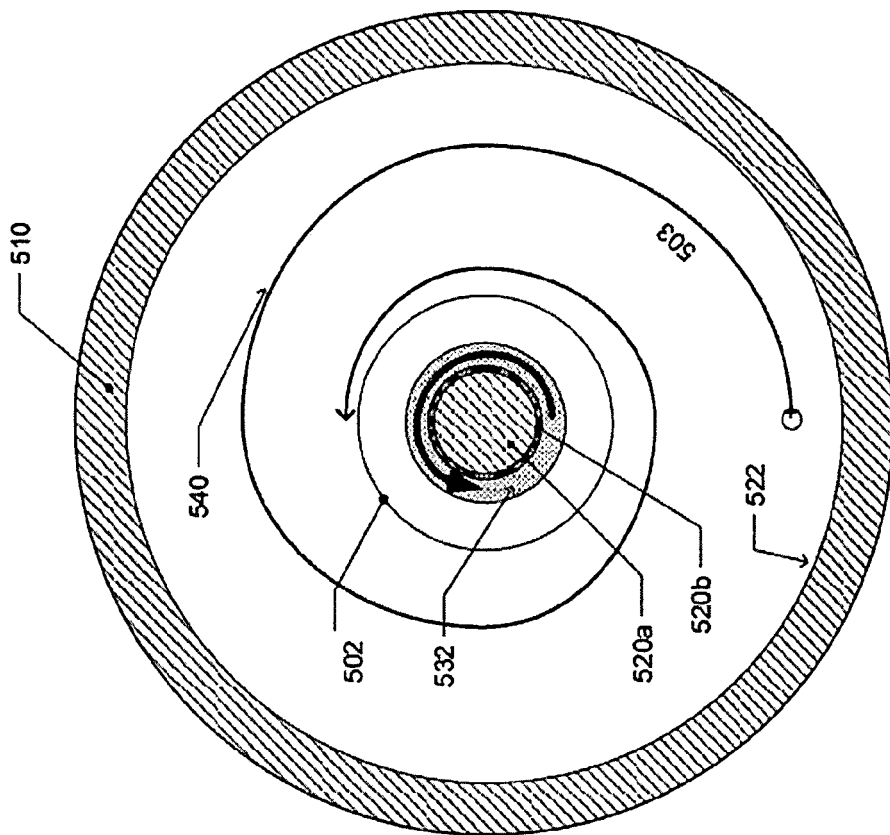
【圖 5a】



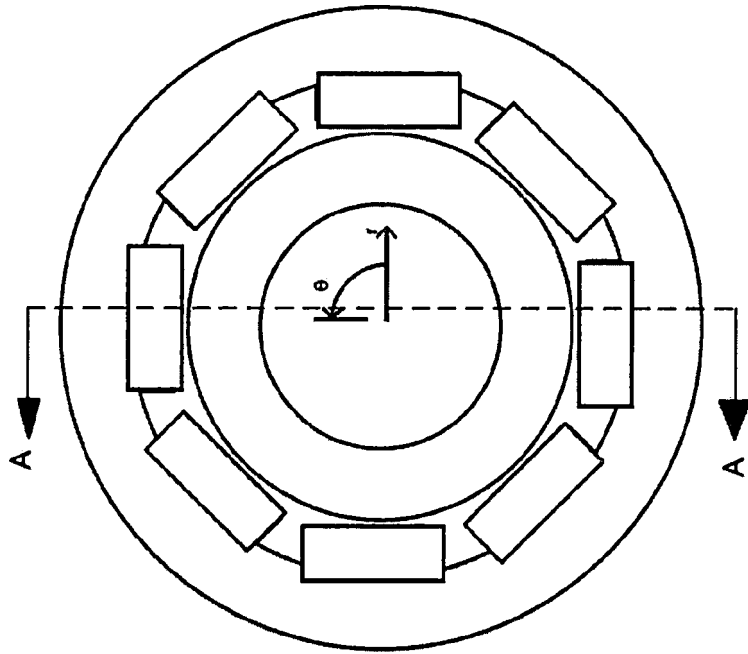
【圖 5b】



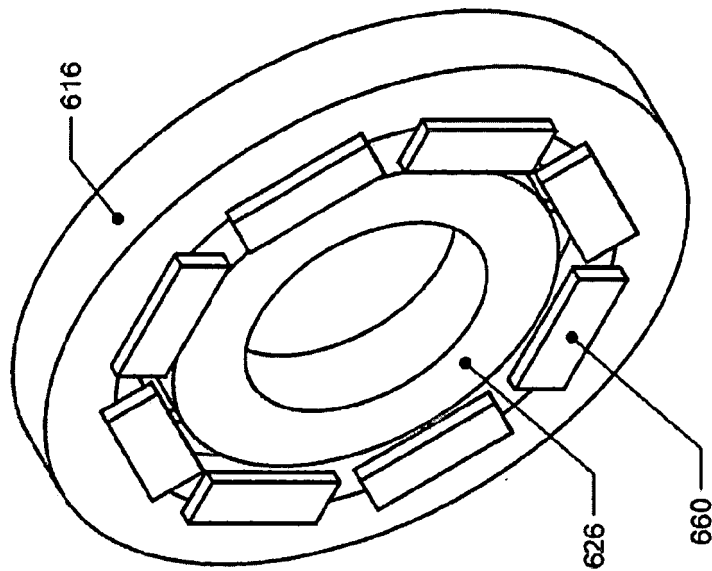
【圖 5c】



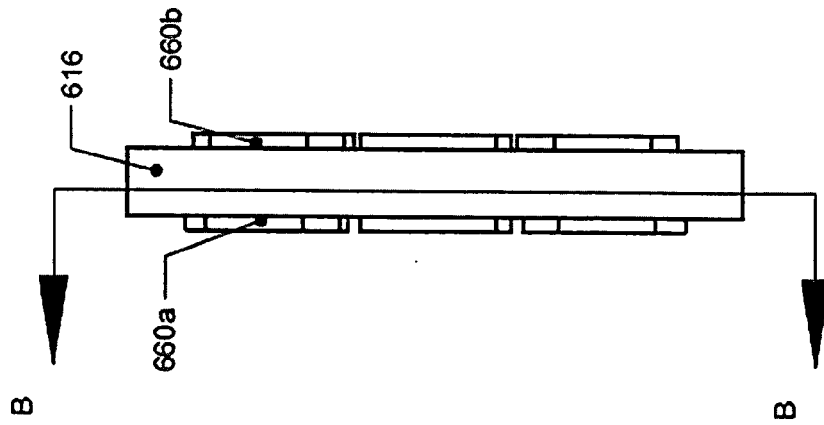
【圖 5d】



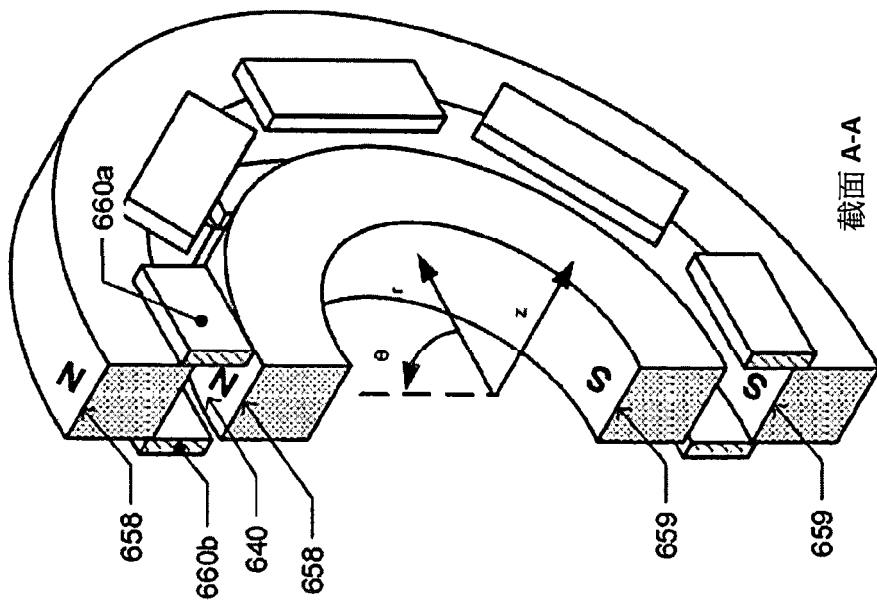
【圖 6b】



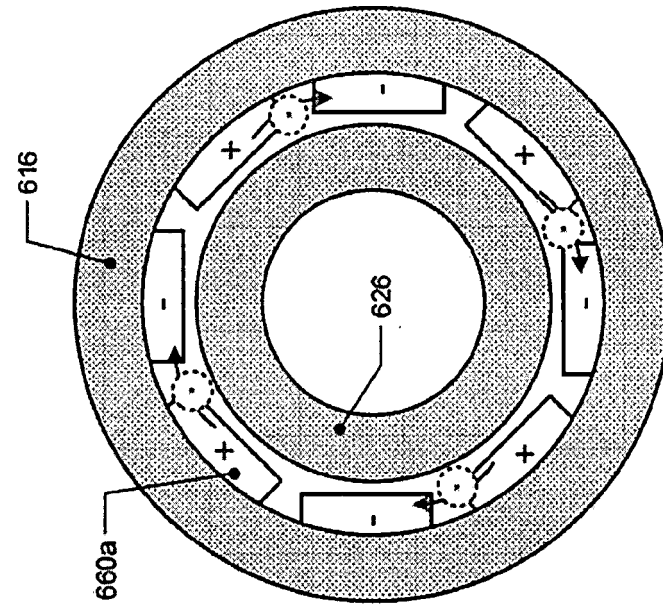
【圖 6a】



【圖 6d】

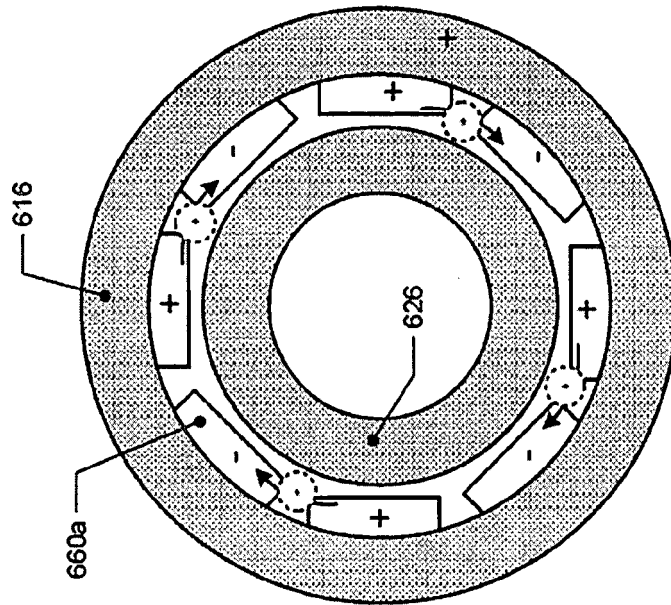


【圖 6c】



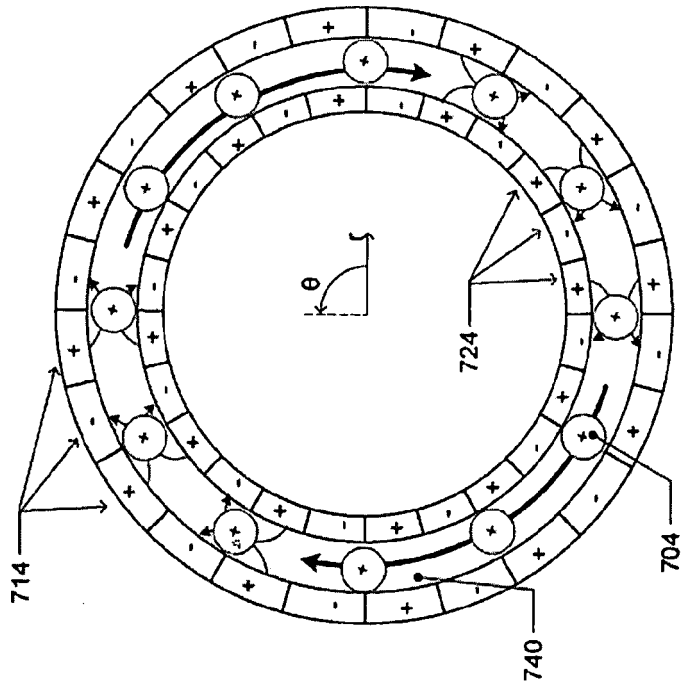
截面 B-B

【圖 6f】

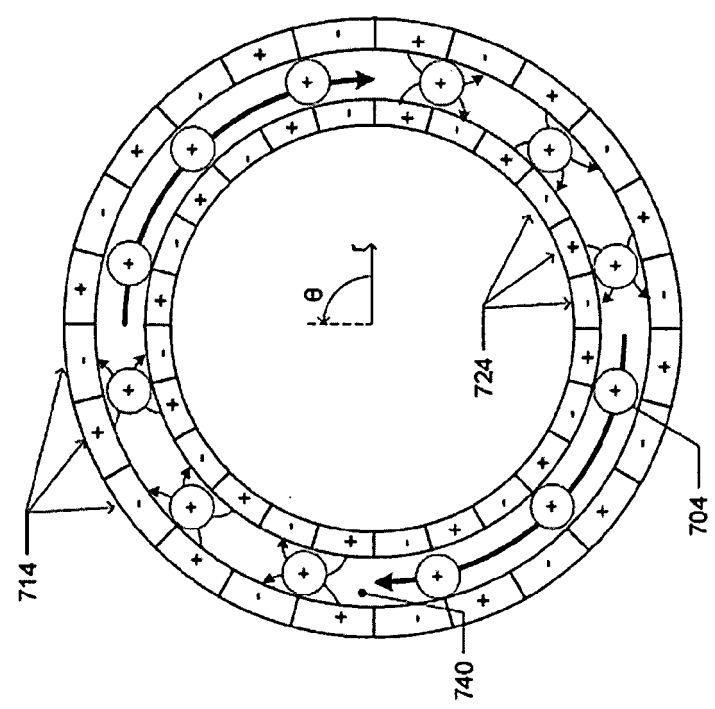


截面 B-B

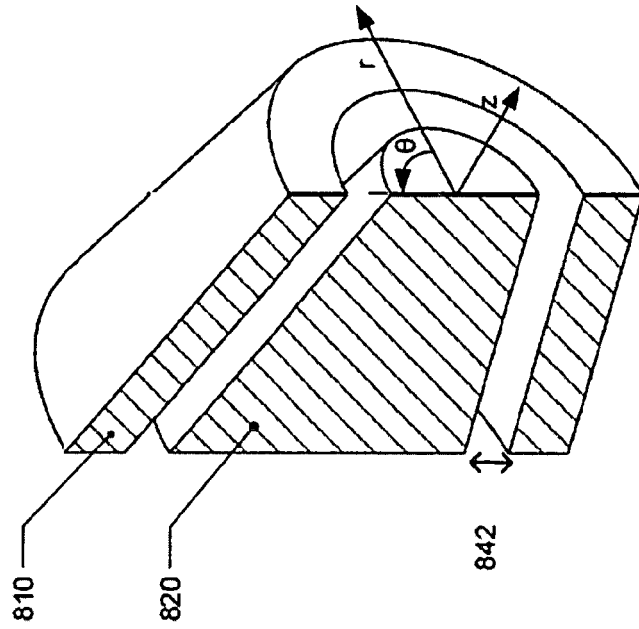
【圖 6e】



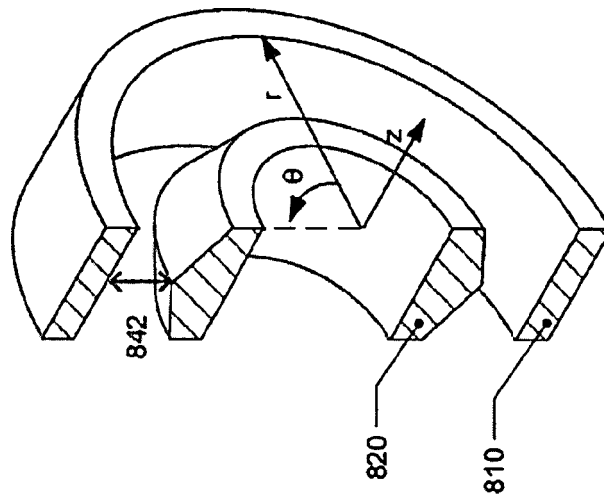
【圖 7b】



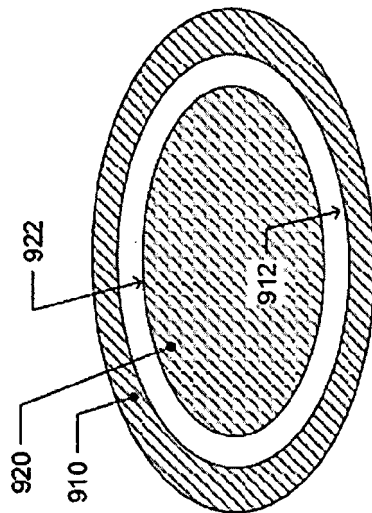
【圖 7a】



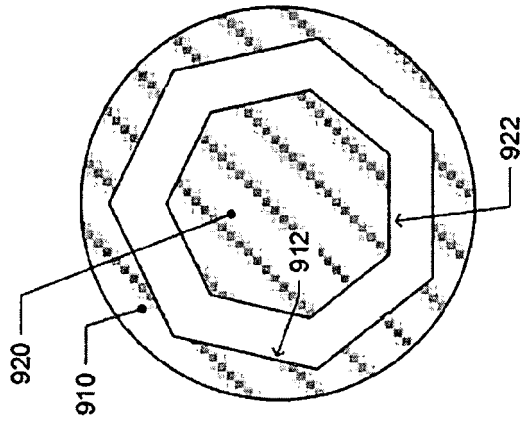
【圖 8b】



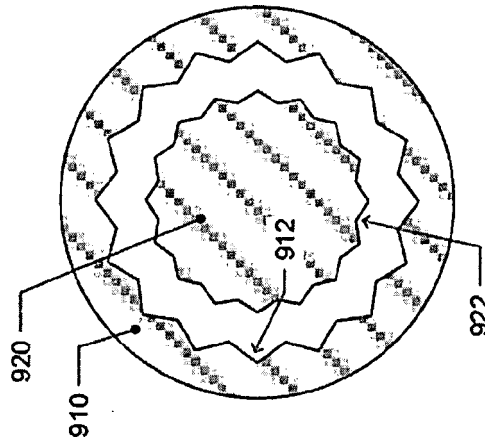
【圖 8a】



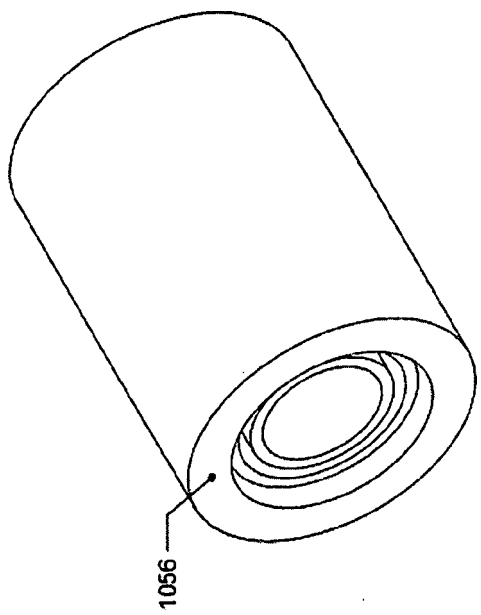
【圖 9a】



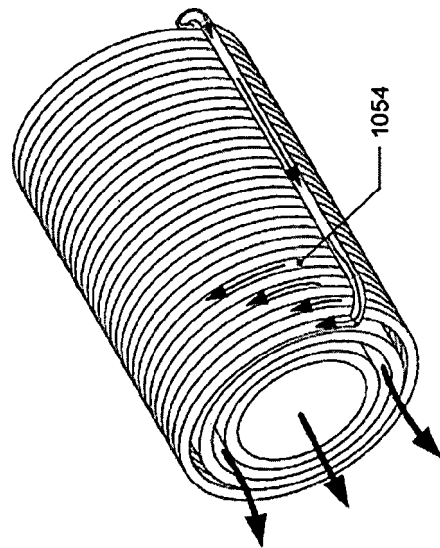
【圖 9b】



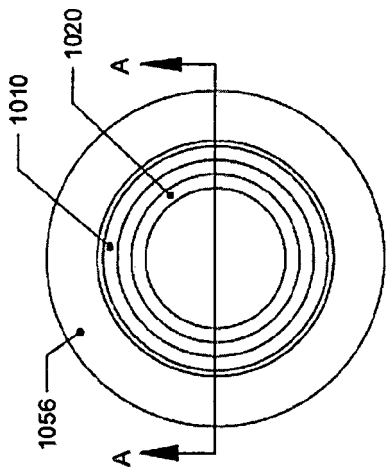
【圖 9c】



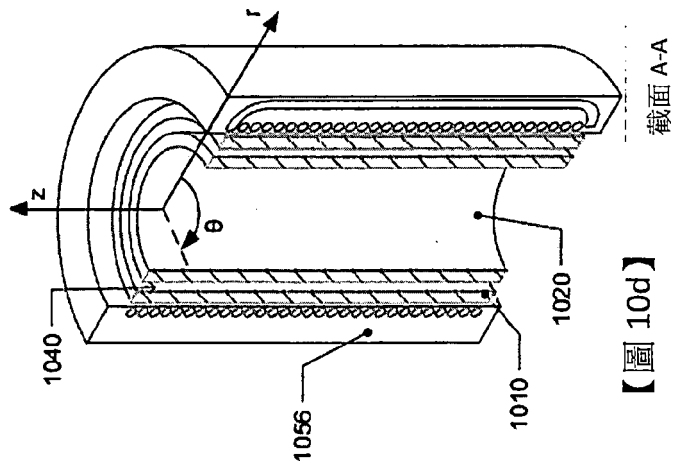
【圖 10a】



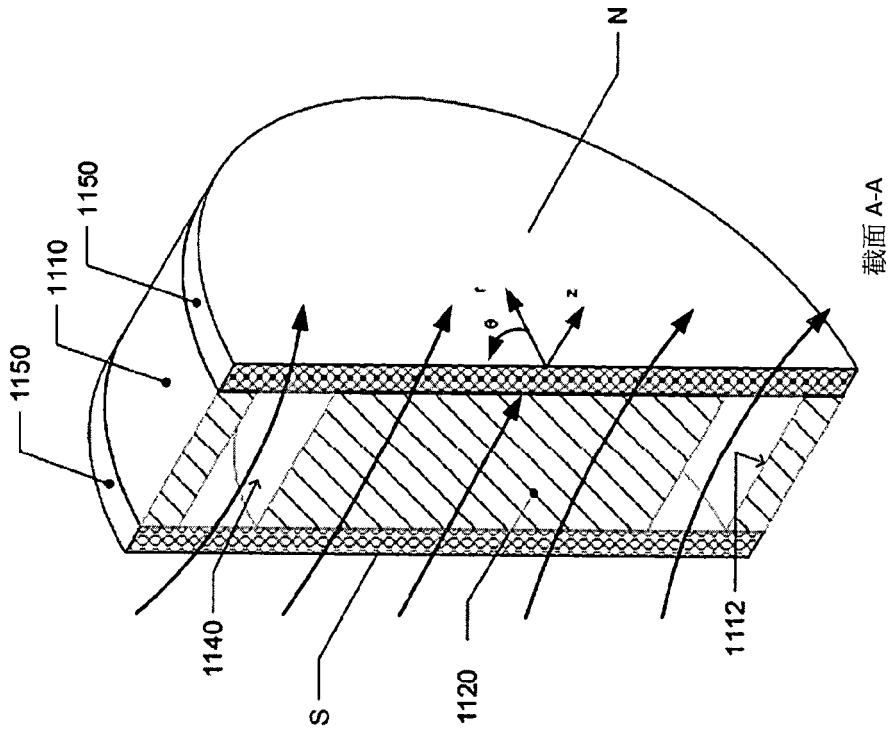
【圖 10b】



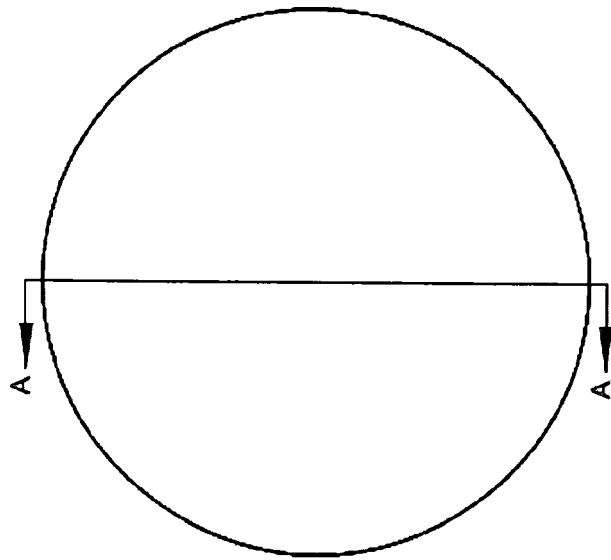
【圖 10c】



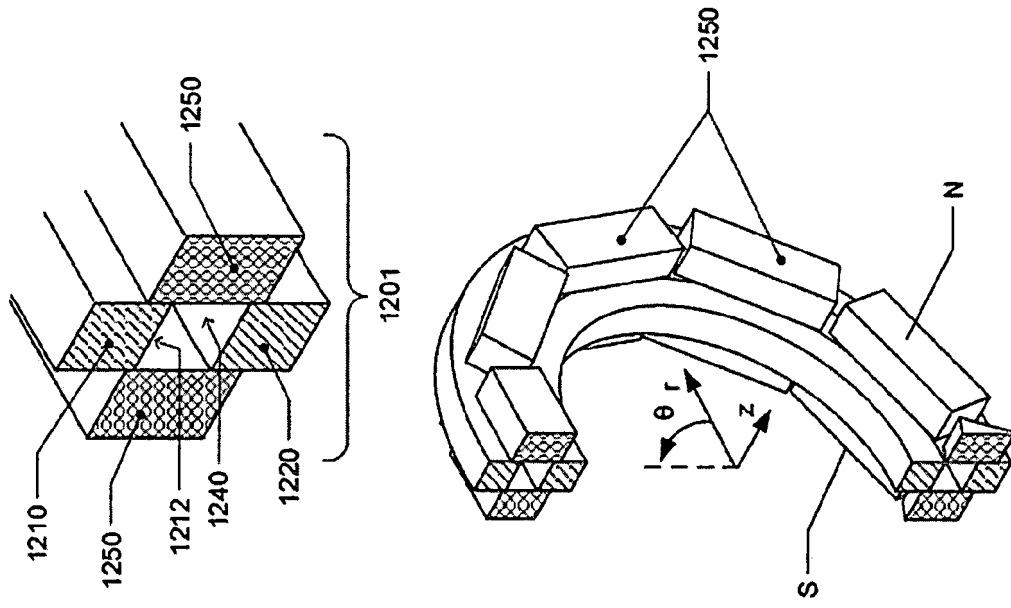
【圖 10d】



【圖 11b】

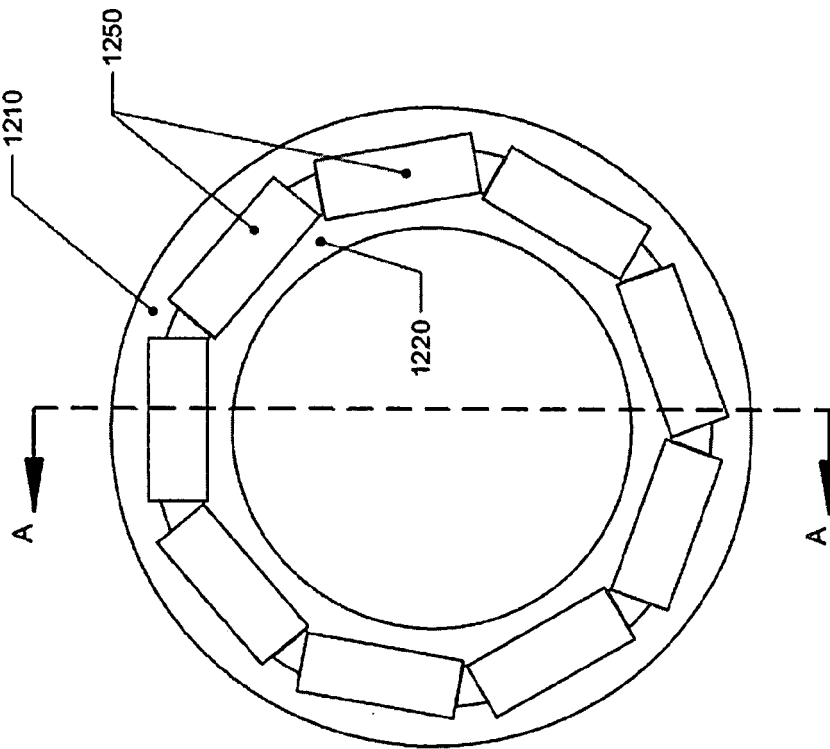


【圖 11a】

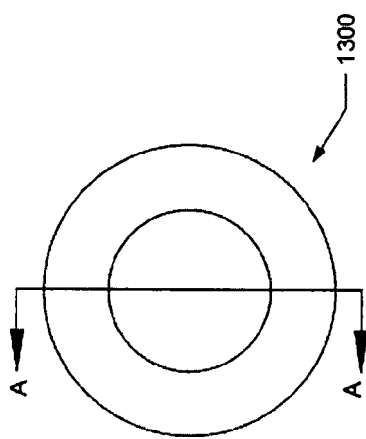


截面 A-A

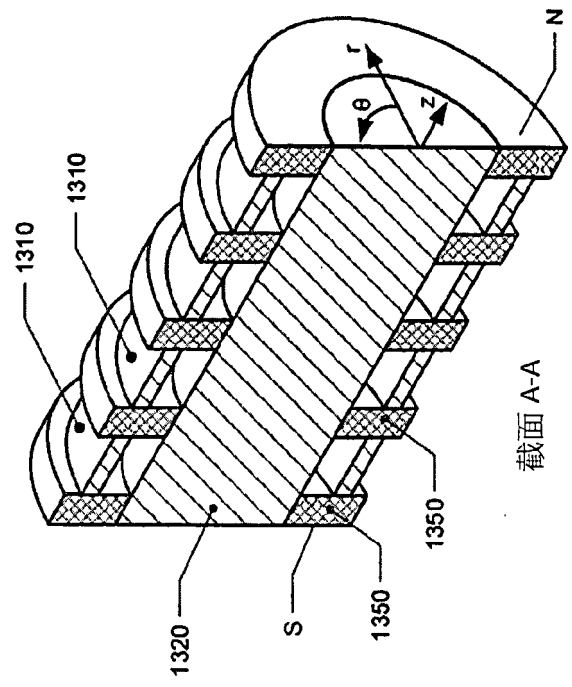
【圖 12b】



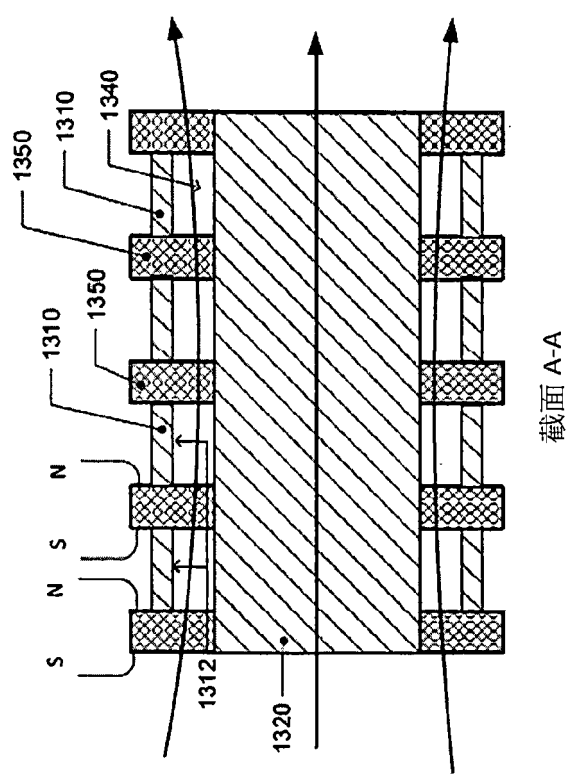
【圖 12a】



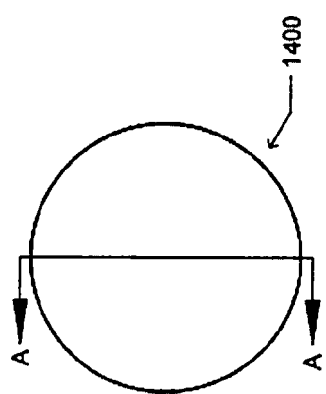
【圖 13a】



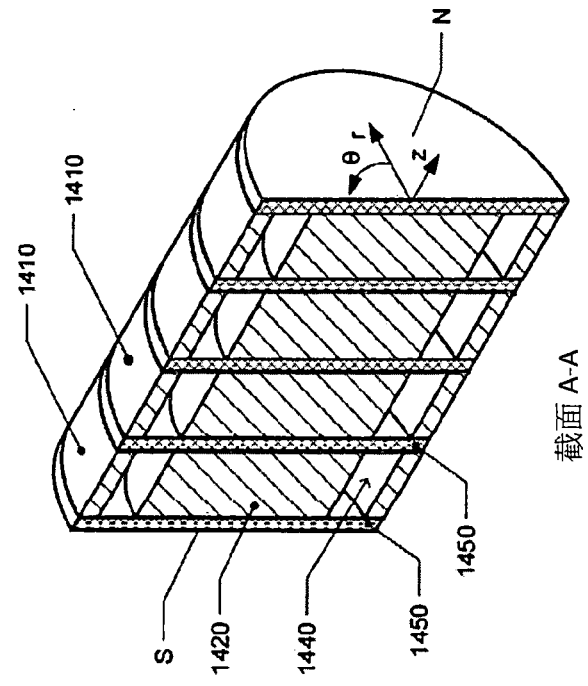
【圖 13c】



【圖 13b】

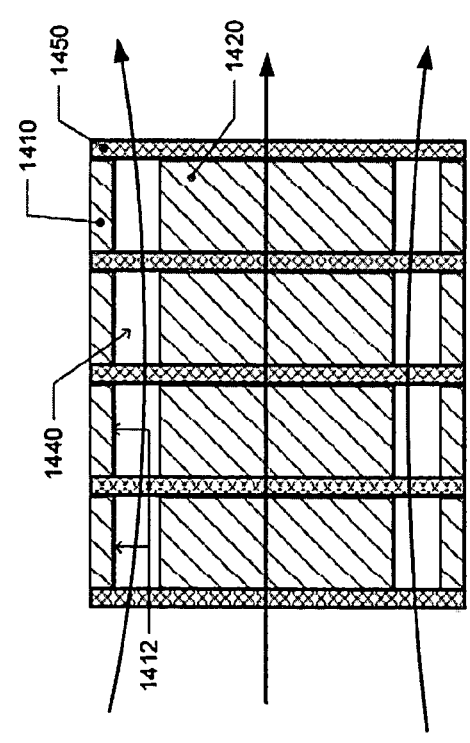


【圖 14a】



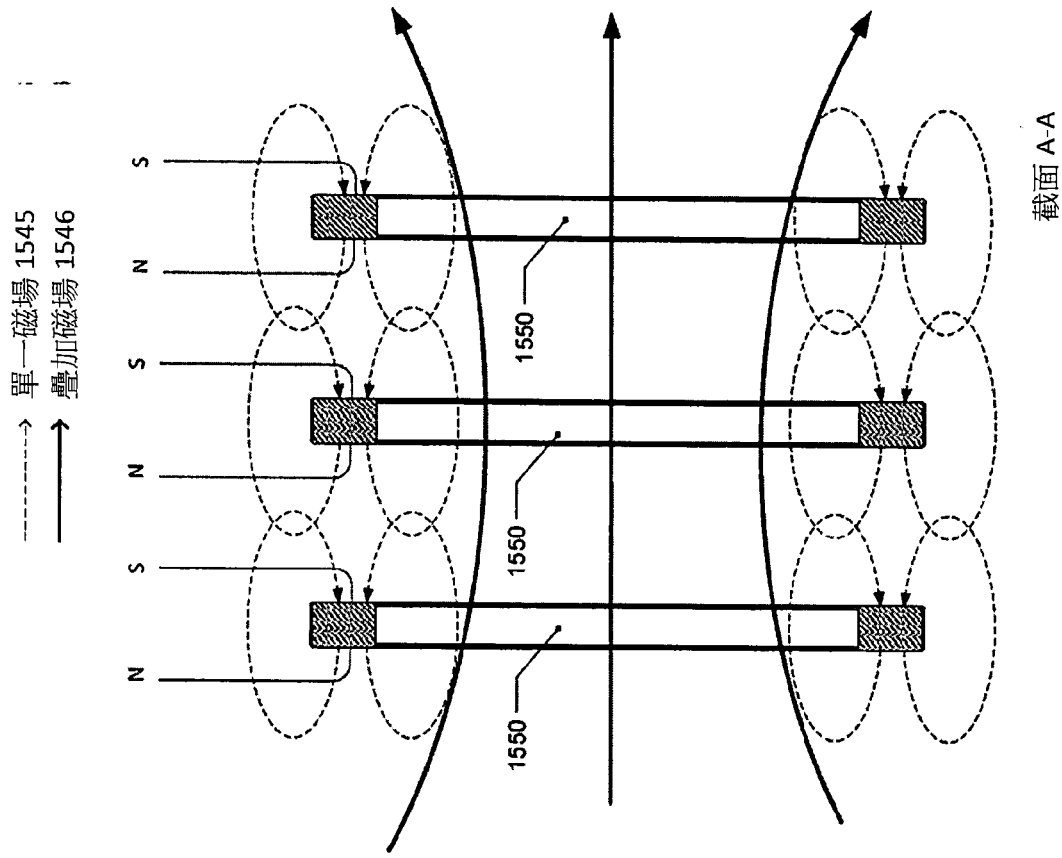
截面 A-A

【圖 14c】

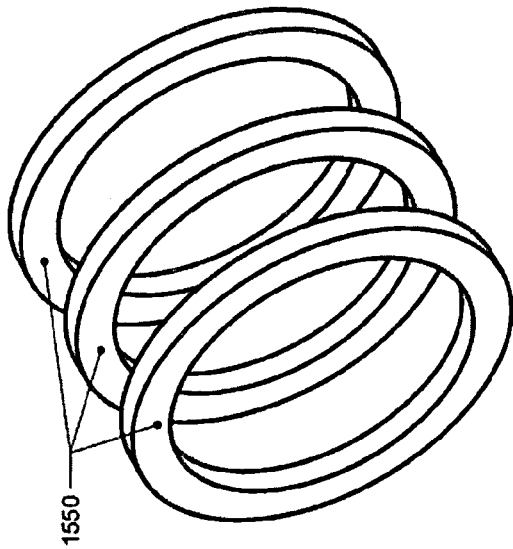


截面 A-A

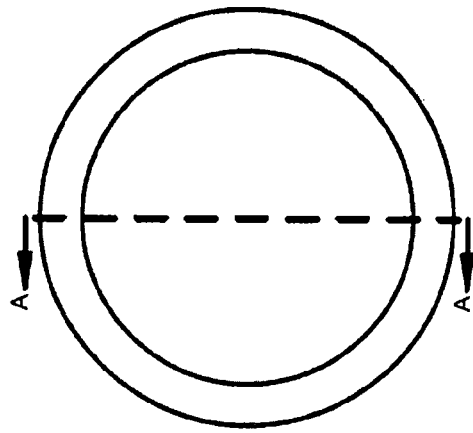
【圖 14b】



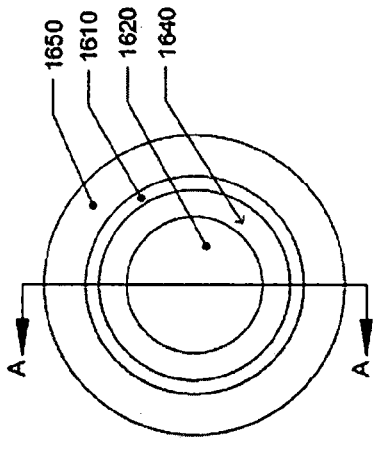
【圖 15c】



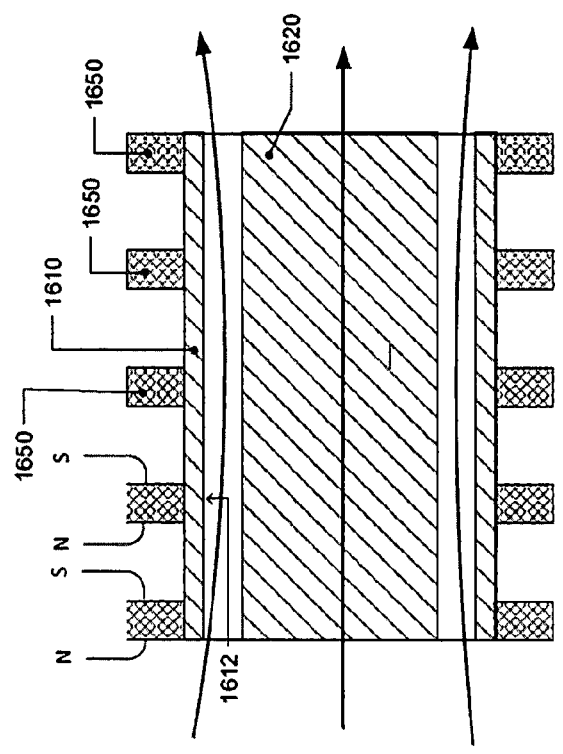
【圖 15a】



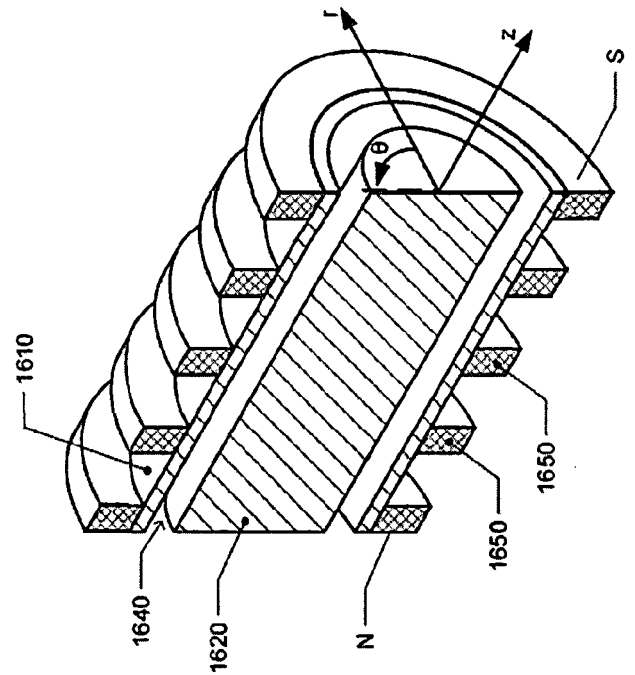
【圖 15b】



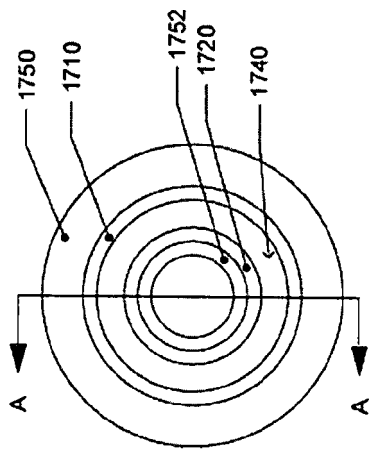
【圖 16a】



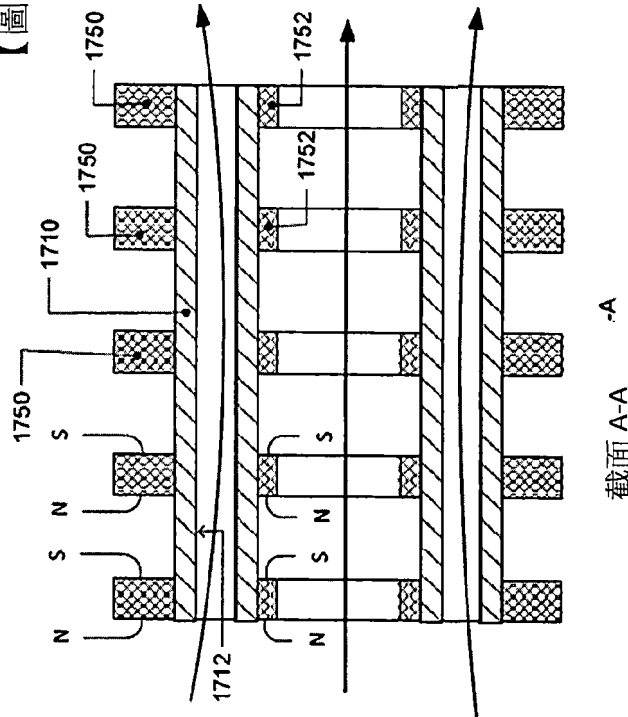
【圖 16b】



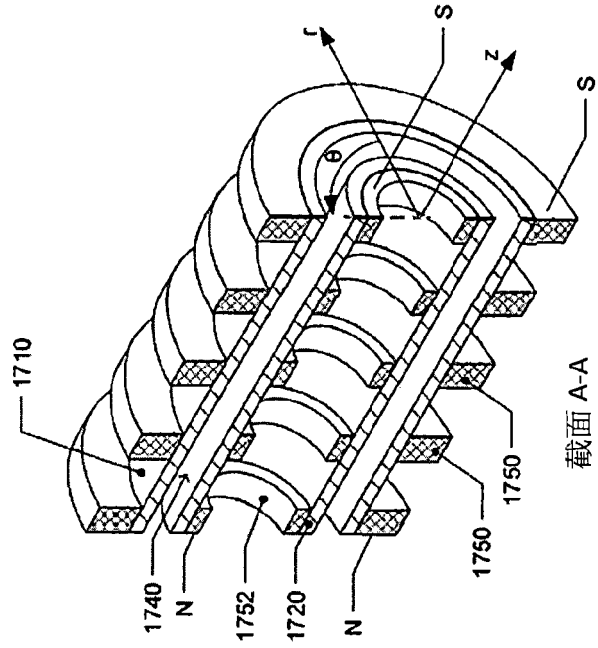
【圖 16c】



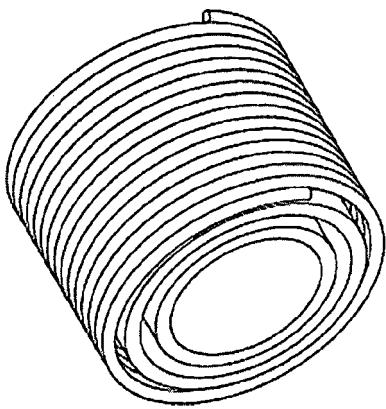
【圖 17a】



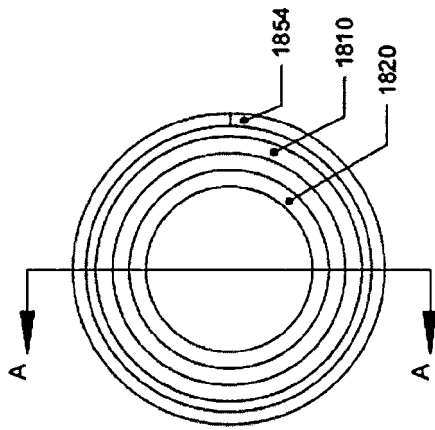
【圖 17b】



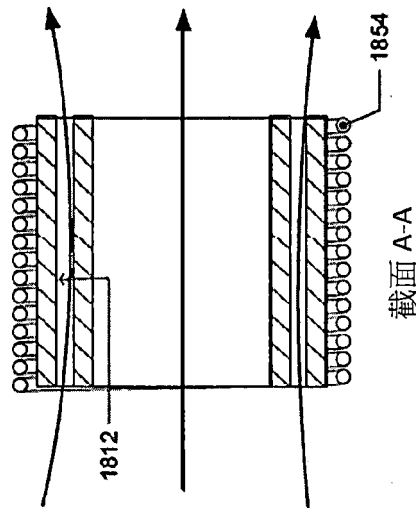
【圖 17c】



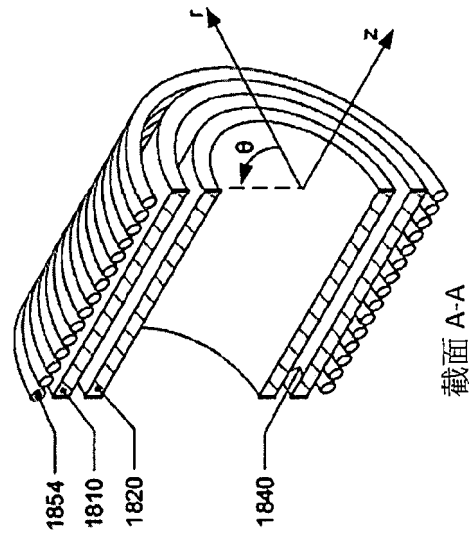
【圖 18a】



【圖 18b】

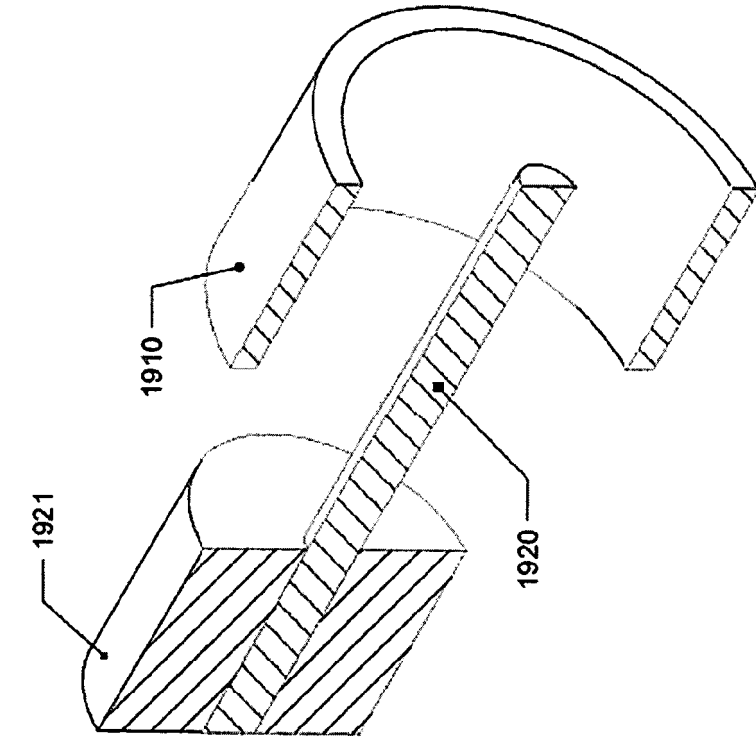


【圖 18c】

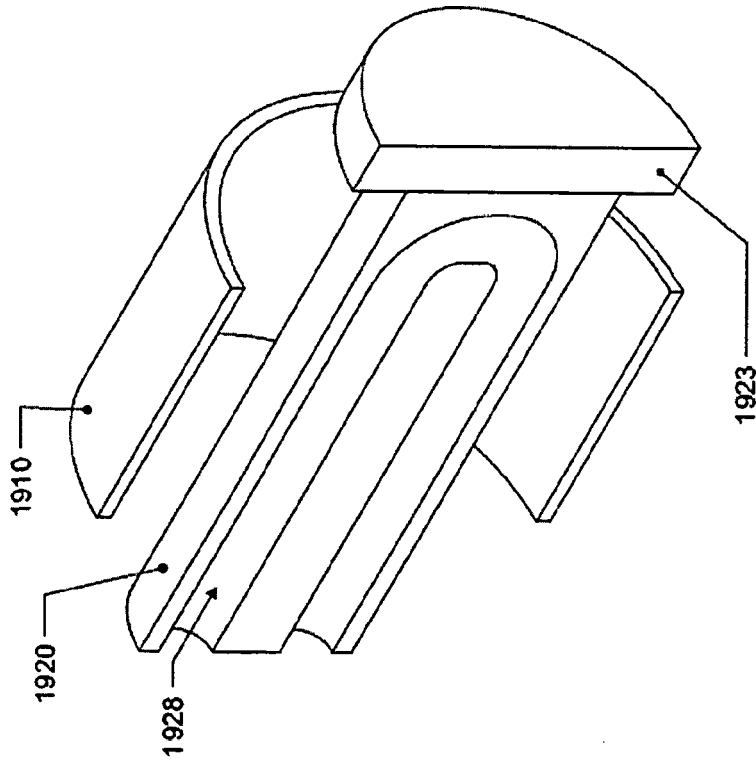


截面 A-A

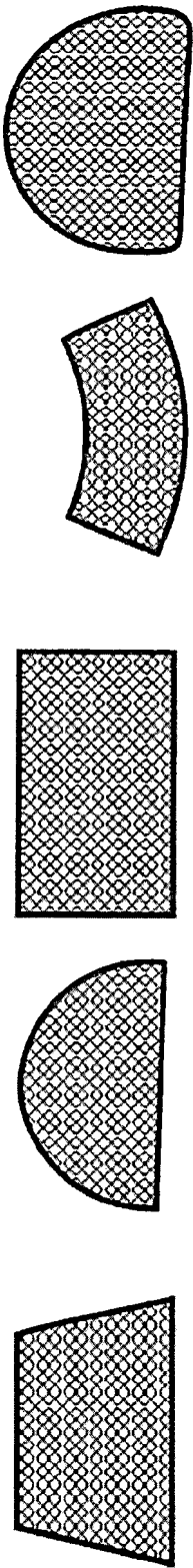
【圖 18d】



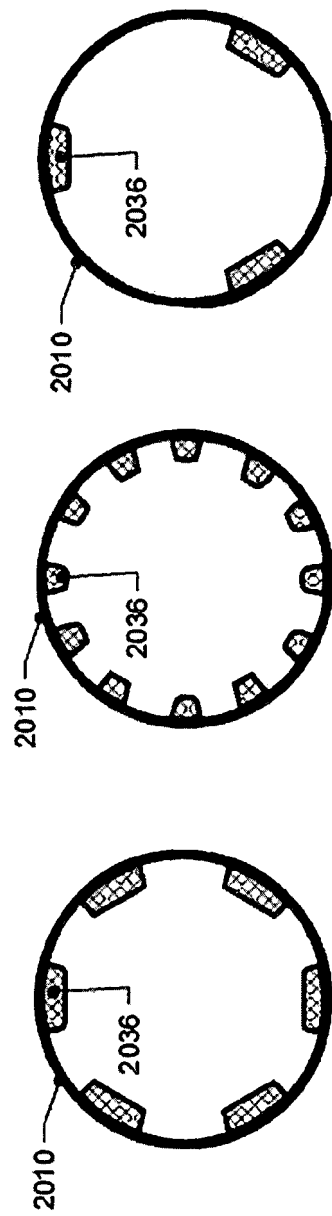
【圖 19b】



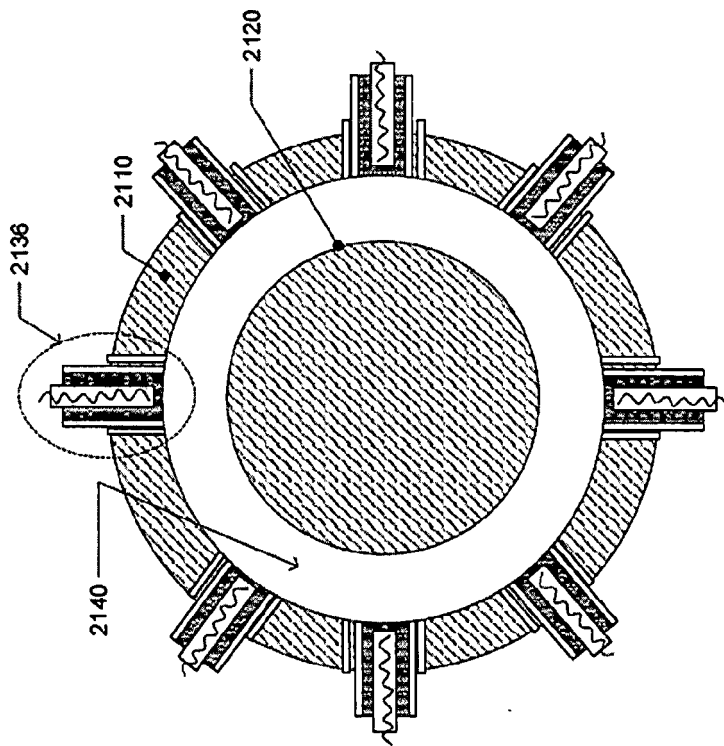
【圖 19a】



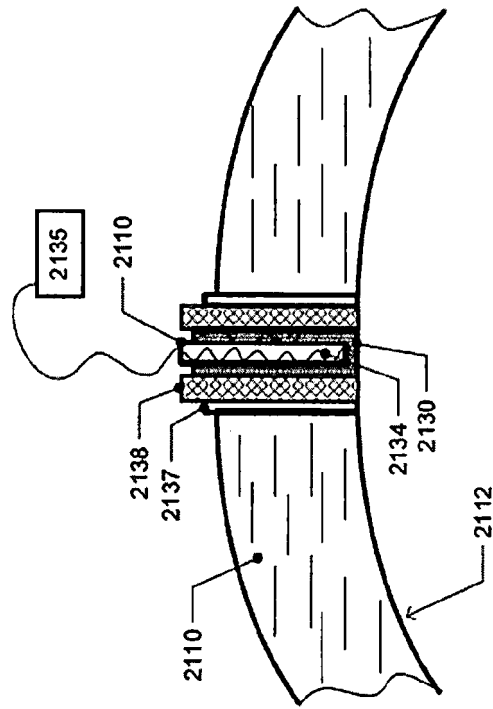
【圖 20a】



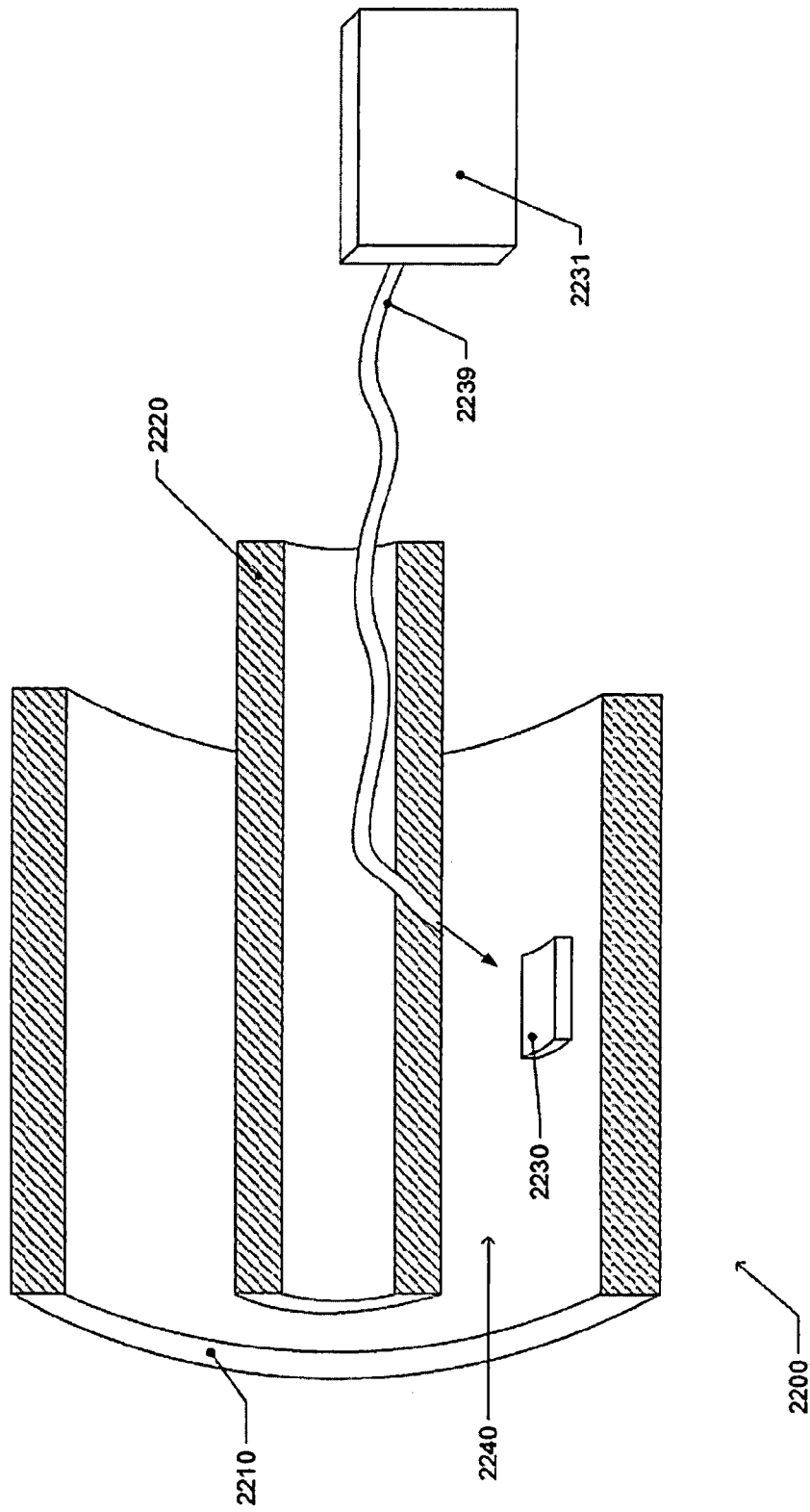
【圖 20b】



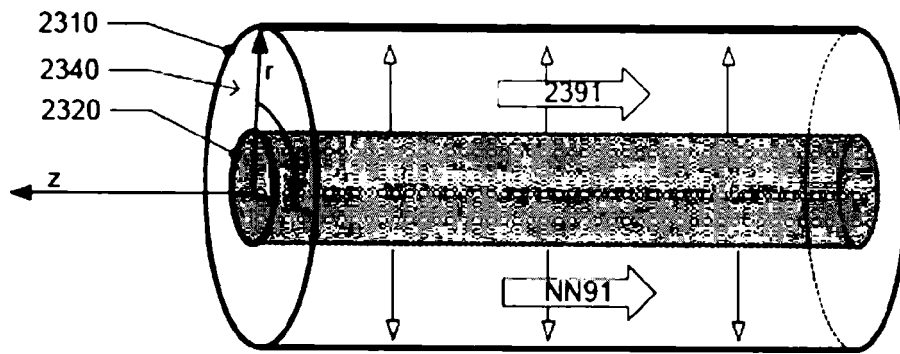
【圖 21a】



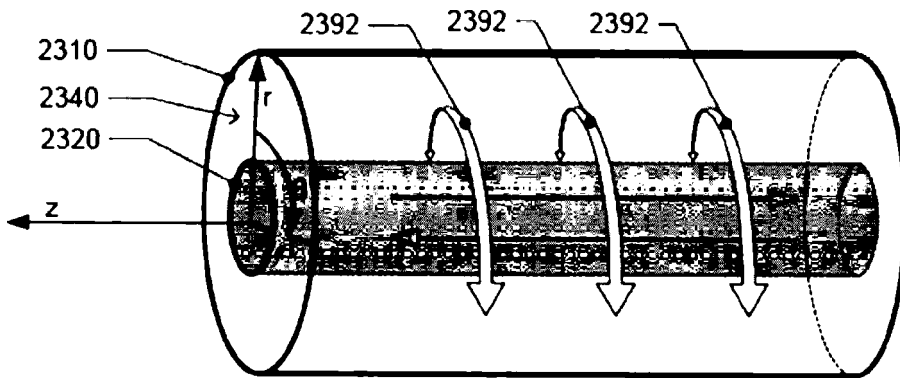
【圖 21b】



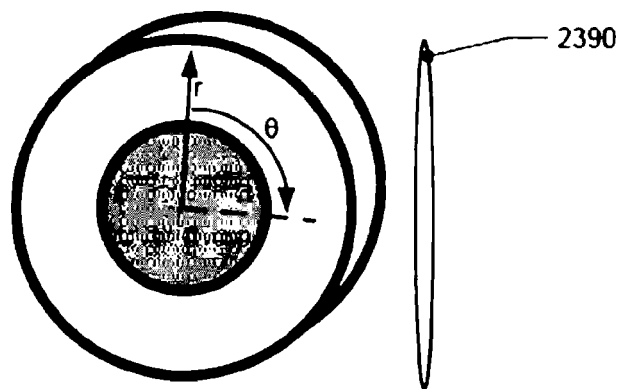
【圖 22】



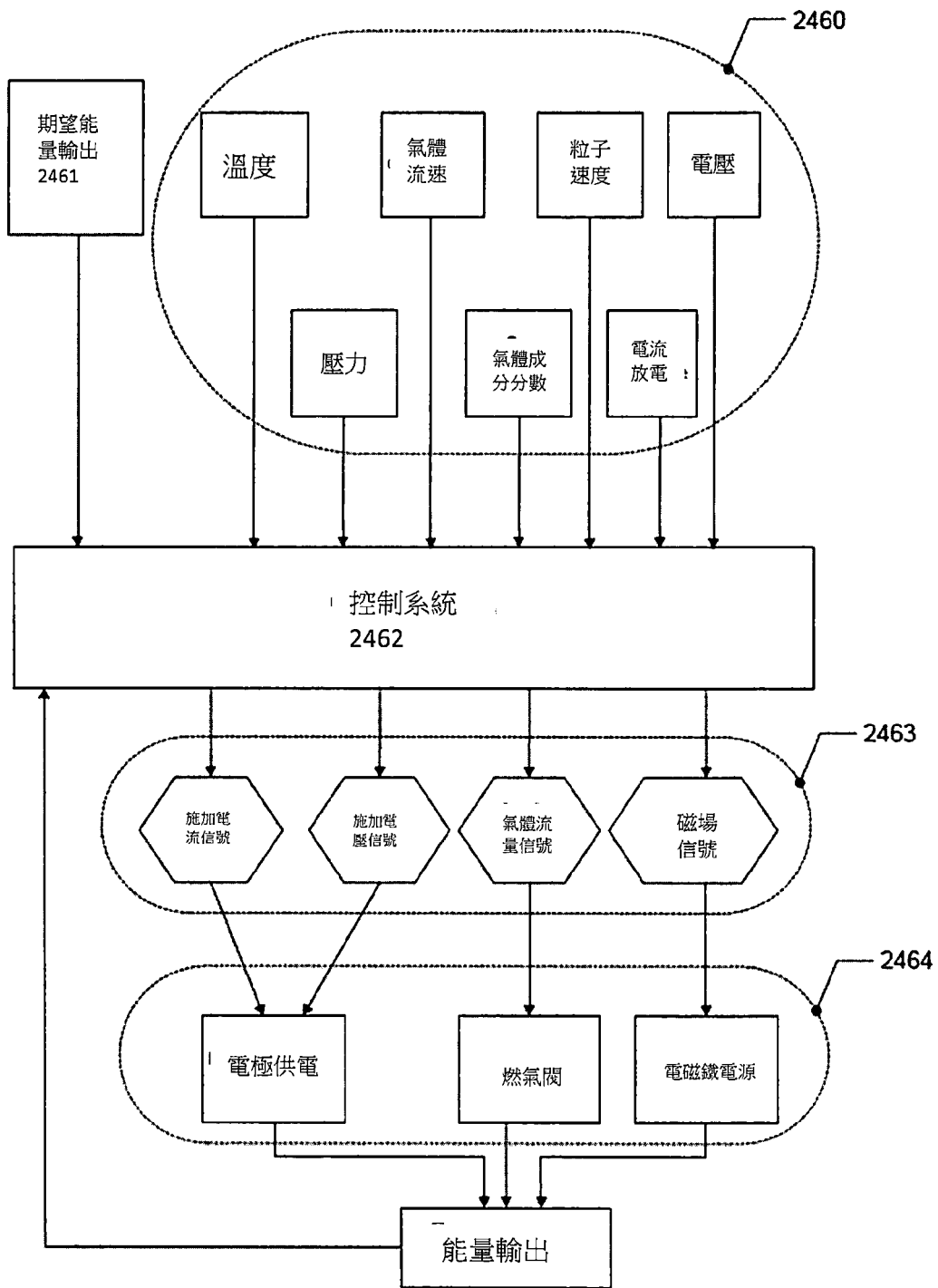
【圖 23a】



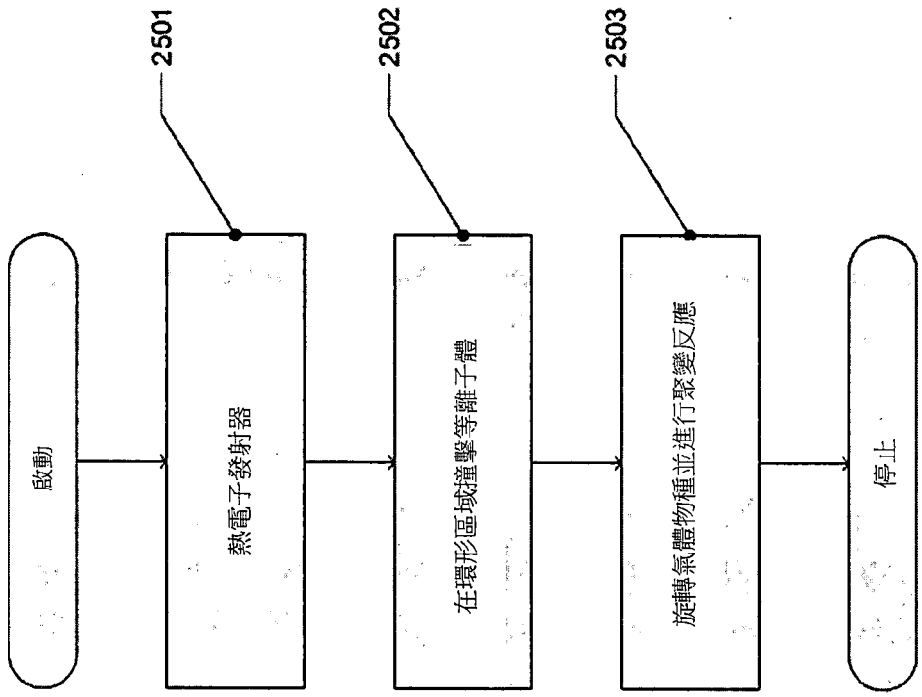
【圖 23b】



【圖 23c】



【圖 24】



【圖 25】