



(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 201216549 A1

(43)公開日：中華民國 101 (2012) 年 04 月 16 日

(21)申請案號：100135560

(22)申請日：中華民國 100 (2011) 年 09 月 30 日

(51)Int. Cl. : *H01M8/00 (2006.01)*

H01M8/04 (2006.01)

(30)優先權：2010/09/30 美國

US 61/388,359

2011/06/30 美國

US 13/174,686

(71)申請人：全球能源科學有限公司 (美國) GLOBAL ENERGY SCIENCE, LLC. (US)
美國

(72)發明人：費雪 哈伯特 FISCHER, HALBERT (US)

(74)代理人：莊志強

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：14 項 圖式數：4 共 50 頁

(54)名稱

利用交叉流動及泰勒渦旋流之厚電極直接反應燃料電池

THICK ELECTRODE DIRECT REACTION FUEL CELLS UTILIZING CROSS-FLOWS AND
TAYLOR VORTEX FLOWS

(57)摘要

本發明提供直接反應燃料電池(10)，其係具有透過含有觸媒粒子之混合物的厚多孔電極(12,18)之旋轉，而在電解液室(24)產生泰勒渦旋流(54)和圓形庫頁特流(56)的電解液混合物之交叉流動(cross-flow)。



(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 201216549 A1

(43)公開日：中華民國 101 (2012) 年 04 月 16 日

(21)申請案號：100135560

(22)申請日：中華民國 100 (2011) 年 09 月 30 日

(51)Int. Cl. : *H01M8/00 (2006.01)*

H01M8/04 (2006.01)

(30)優先權：2010/09/30 美國

US 61/388,359

2011/06/30 美國

US 13/174,686

(71)申請人：全球能源科學有限公司 (美國) GLOBAL ENERGY SCIENCE, LLC. (US)
美國

(72)發明人：費雪 哈伯特 FISCHER, HALBERT (US)

(74)代理人：莊志強

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：14 項 圖式數：4 共 50 頁

(54)名稱

利用交叉流動及泰勒渦旋流之厚電極直接反應燃料電池

THICK ELECTRODE DIRECT REACTION FUEL CELLS UTILIZING CROSS-FLOWS AND
TAYLOR VORTEX FLOWS

(57)摘要

本發明提供直接反應燃料電池(10)，其係具有透過含有觸媒粒子之混合物的厚多孔電極(12,18)之旋轉，而在電解液室(24)產生泰勒渦旋流(54)和圓形庫頁特流(56)的電解液混合物之交叉流動(cross-flow)。

六、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明係屬於直接反應燃料電池之領域，該直接反應燃料電池係利用將高氫含量燃料中的化學能直接轉化為電能，而不需為了熱能而燃燒該燃料或為了產生氫氣（ H_2 ）而將其重組，並結合以觸媒充填之厚電極、流經電極之電解液交叉流動，以及在電極與電極間的電解液之間提供相對運動的裝置－包括旋轉電極的裝置（美國分類 429/67-69，國際分類 H01M 2/38），以及容許流體反應物或電解液進入或離開電池的裝置（美國分類 429/513，國際分類 H01M 8/04），從而透過泰勒渦旋流（Taylor Vortex Flows, TVF）與圓形庫頁特流（Circular Couette Flows, CCF）達成加速的化學反應速率。

【先前技術】

大多數利用水溶液化學（aqueous chemistry）的現行燃料電池通常會結合厚度小於 150 微米（ μm ）的電極與質子交換膜（proton exchange membrane, PEM），以保留電解液且避免燃料和氧化劑在電池的電解液中的越區（crossover）現象。這些膜也可作為陽極和陰極電極間與該等膜之對立面接觸的電氣絕緣分離器。質子交換膜與其電極的組合被稱為「膜電極組件」（membrane electrode assembly, MEA）。

質子交換膜（PEM），例如 NAFION[®] 合成聚合物（杜邦公司生產），其限制了發生在該膜與其鄰近之構成膜電極組件的含觸媒陽極和陰極電極之接合部的「燃料－電解液－觸媒」與「氧化劑－電解液－觸媒」的三相還原/氧氣（氧化還原）反應在電解液、溫度和壓力方面的選擇性。

在 NAFION[®] 聚合物質子交換膜的情形，必須使用酸性電解液，且工作溫度不可超過 190°C。因此，必需使用昂貴的催化劑（例如：鉑族金屬），以促進氧化還原反應，而不是於電解液中腐蝕。此外，液體燃料與氧化劑必須經過重組，以獲得氣體，且不良反應物（例如：水）必須經由平衡系統（Balance-of-plant，BOP）而加以除去。

膜電極組件（MEA）電極-質子交換膜介面主機在可以發生氧化還原反應的氣體擴散層（gas diffusion layers）。這些薄層一般厚度為 10 至 50 微米。與質子交換膜相鄰的電極面在約 10 至 30 微米的深度含有觸媒粒子（例如：鉑、鉑合金），其大約為一膜電極組件之厚度的 1%。該氣體擴散薄層有助於限制電流密度至約每平方公分電極 300 毫安（mA）。因此，先前技術的燃料電池在每瓦成本和每立方公分功率方面毫無競爭力。此在質子交換膜（PEM）直接反應燃料電池尤屬真實。

在本案發明人於 2011 年 7 月 5 日申請之美國第 7,972,747 號專利中所教示之直接反應燃料電池（以下簡稱「'747 號專利」），及本說明書所揭露之利用泰勒渦旋流之厚電極直接反應燃料電池（*Thick Electrode Direct Reaction Fuel Cells Utilizing Taylor Vortex Flows*），透過提供一燃料電池，其包含建立在陰極和陽極之間的電極電解質泰勒渦旋流（TVF），免除了對質子交換膜的需求，從而克服了質子交換膜（PEM）燃料電池在溫度、質子傳送速率（proton transfer rate）、氧還原反應過電壓（oxygen reduction overvoltage）、電解液儲存和化學選擇性上的限制。TVF 可容許水性燃料電池的工作溫度提高至 190°C 以上，超越了

基於質子交換膜所施加的限制，並容許提高至 200°C 或更高的溫度。較高的溫度促進了氧化還原反應速率的提高，並容許以經濟的鎳及其他低成本觸媒來取代昂貴的鉑族金屬觸媒。質子交換膜的排除也除去了化學作用在選擇性上的限制，而容許使用酸性或鹼性之電解液，在處理及處置反應副產物（例如：一氧化碳）或終端產物（例如：水）方面提供了更多選擇性，處理和處置的反應副產物或的使用。本發明的厚電極直接反應燃料電池進一步透過提供厚電極以促進電解液的交叉流動的使用的嶄新架構，以低資金成本實現了前所未有的電流密度，而提供了對燃料電池的電流密度及經濟性的改良。

【發明內容】

本發明的厚電極直接反應燃料電池降低了先前技術之燃料電池的電流密度與反應速率之間的限制關係，而獲得更高的輸出電流和功率密度（瓦特/立方公分，Watts/cm³）。這一成就是透過對燃料電池之組件加以重新安排而達成，以使得：(1) 可使用厚電極；(2) 電極的全部體積可以充填觸媒，以及(3) 經過電極之電解液及燃料或氧化劑之交叉流動，其可與藉由結合厚電極和浸潤之觸媒而增加之表面積參與三相還原或氧化（氧化還原）反應。

在質子交換膜燃料電池中的電極，其厚度係從電極-質子交換膜（PEM）介面的正交（orthogonal）方向加以測量。在包含陽極和陰極電極，以及在電極之間的電解液或介電間隙的厚電極直接反應燃料電池，電極之厚度係從電極與間隙之間的介面之正交方向加以測量。

厚電極係以觸媒粒子填充，並使之充滿無論是燃料或

是氧化劑與電解液混合之交叉流動（例如：在大約正交於電極與間隙之間的介面的方向的橫向流動(transverse flow)）。該混合物通過電極厚度的通路將氧化還原反應的深度從傳統的燃料電池的可能 50 微米增加至整個電極的厚度。這有利於更多的電解液與更大的化學計量數量（stoichiometric amounts）的燃料或氧化劑在特定的燃料電池體積的觸媒表面參與氧化還原反應。此外，如今的電極厚度已足以促進電解液與燃料或氧化劑的駐留時間（residence time）超越其固有的反應速率時間（reaction-rate time）的限制。更進一步地，在陽極和陰極電極的深度內產生剩餘的調和離子，而使得在電解液與反應物之間的模擬之化學計量平衡更容易達成。由於這些改良有助於提高功率和能量密度，且工作溫度可提高至 200°C 以上，如今已可應用鎳或其他較廉價之觸媒而達成商業上可接受之性能/成本之目標。

發明人於 2011 年 6 月 28 日提出申請之美國第 13/171080 號專利申請案（以下簡稱「'080 號專利申請案」）中，導入了一種在蓄電池（battery cells）中的厚電極的獨特應用。透過比較，先前技術的電池電極厚度約為 10 至 100 微米，而在任何同一時間內僅具有較窄之 1 至 30 微米之反應區厚度之電化學活性之電極。發明人之'080 號專利申請案中的電極則可達到 3,175 至 12,500 微米的厚度，且電極之全部均具有電化學活性。

發明人的'080 號專利申請案中的交叉流電池與在本說明書中所揭露的厚電極直接反應燃料電池，此二者在概念上的比較可以有助於瞭解燃料電池動力學的複雜性。無論

是蓄電池和燃料電池均包含了流通的、相當厚的含有高度分散的 (highly-dispersed)、高表面積之粒子材料的細多孔金屬結構 (在流體流動方向)。然而，蓄電池和燃料電池之間仍有一個重大的結構與概念的區別，亦即：蓄電池支援二相 (液體電解液與固態法拉第材料) 氧化還原反應，而燃料電池則支援三相氧化還原反應 (液態電解液、氣態燃料及氣態氧化劑與固態觸媒材料)。

在蓄電池中係以法拉第材料來儲存能量，但在燃料電池，能量則是透過燃料而導入。在燃料電池中，以固相參與氧化還原反應的是觸媒，即使如此，在某些情況下，觸媒僅是暫時地參與氧化還原反應。

發明人之交叉流動蓄電池與厚電極直接反應燃料電池的重要共同性在於水的氧化還原化學反應產生在陽極的深處產生陽離子，並在陰極的深處產生陰離子。這些特徵形成了發明人的交叉流動蓄電池以及厚電極直接反應燃料電池與先前技術的蓄電池與燃料電池的區別，因為在後者，離子是在表面或在接近表面的薄層或區域內產生。

無論是交叉流動蓄電池，或是厚電極直接反應燃料電池，其特徵在於其均可將離子從其各自的電極深處內移動至陰離子可與陽離子中和的位置之間 (例如：電極間之含有電解液的間隙)。這些從其各自電極的深處內，朝對方流動的過量離子流產生一個與通過外部電力負載的電子流達到完全平衡的離子電荷電流 (ionic charge current)。

在本發明的交叉流動蓄電池，不能壓縮 (incompressible) 之液體電解液充分發揮其過量離子之電極間傳遞的必要功能。在本文所教示之厚電極直接反應燃

料電池，在多孔電極內的氣相對系統參數設立了更嚴格的要求。特別是，由於一回應於受控制之間隙中之電解液的 TVF 的軸向流動 (axial flow) 而形成之差壓 (pressure differential)，在各電極內的液相 (含有聚集之過量離子的電解液) 被吸入流動於電極間之間隙的電解液。此外，在間隙的 TVF 產生了一個吸力，其專門運作於被 TVF 內的渦漩所捕集之以放射氣泡的形式來自於各電極之相對表面的氣相。除此之外，可以電磁和電聲力 (electro-magnetic and electro-acoustic forces) 在深層電極內所產生的過量電荷施加力量，以加速其在向間隙之較佳方向的傳輸。

此外，本發明之厚電極直接反應燃料電池的電極之厚度可為 500 至 10,000 微米—其所有部分均可充滿觸媒。厚電極直接反應燃料電池使用活性較低而廉價的觸媒粒子，但數量則更多。一個昂貴而可選用於鹼性電解液之厚電極直接反應燃料電池的觸媒為用於氧還原反應 (oxygen reduction reaction, ORR) 的銀。銀的歷史平均價格大約是相當重量的鉑的 1%。

銀與鉑金各自具有 10.5 和 21.45 克/毫升 (gm/ml) 的質量密度 (mass densities)。當銀所使用的質量為鉑的 100 倍時，其成本為相當的，但銀提供了數量為 200 倍의相同大小的粒子，且活性觸媒面積量亦為 200 倍。

在一個典型的 ORR 的投影截面 (projected cross-sectional) 電極，鉑之負載因數 (loading factor) 為 0.5 毫克/平方公分 (mgm/cm^2)。其中反應區體積的 1% 為鉑，此一負載因數僅能提供 23 微米的反應區厚度。這種稀疏分布的每一單位反應區域體積的鉑粒子觸媒表面，適用

於空氣或氧氣的切向流 (tangential flow)；然而，多數氧化劑於通過時並未反應。

在高觸媒表面體積密度，其中密度為 50%，銀之負載因數為 50 毫克/平方公分，提供了一厚度為 95 微米之反應區，會使得厚電極直接反應燃料電池的電極交叉流動有更佳的利用。相較於鉑金粒子，銀可提供數量為其 200 倍的粒子，並在每一單位反應區域體積產出 48 倍於鉑的活性觸媒面積。即使銀的每一公克的分散表面面積或特定催化活性只有鉑的十分之一，銀的淨催化活性仍為 ORR 電極的 20 倍。如果搭配的電極結構有足夠的導電性，以盡量減少 i^2R 損耗，電極所產生之極為保守的功率額定值為 10 瓦/平方公分 (W/cm^2)。

以可比較的每千瓦成本 (cost-per-kilowatt) 為根據，銀的負載因數可提高到於 1,900 微米的反應區的厚度為 1 克/平方公分。這大約是先前技術之質子交換膜直接反應燃料電池 (PEM DRFC) 中之氣體擴散層厚度的 40 倍至 80 倍。對於氧還原反應 (如二氧化錳) 具有較少之特定表面活性的觸媒，其成本會較鉑或銀為低；然而，當以之分散在厚多孔電極之內與電極全體而大幅增加活性面積密度而利用時，卻提供了相等的淨功率性能 (net power performance)。此在本發明之厚電極直接反應燃料電池在會降低氧還原反應的過電壓的高溫下運轉時，尤屬真實。

本發明透過提供結合填充觸媒之電極，其厚度可為 250、500、1000、5000 或 10000 微米或更厚之厚電極直接反應燃料電池，提高了先前技術之燃料電池的電流密度限制。由於觸媒量可以更大，使一折衷方案可實際化，即使

用大量遠為低廉而富於活性之觸媒（例如：在陽極的 RANEY[®]或奈米薄片鎳（nanoflake nickel）或羥基氧化鎳（NiO(OH)），來取代昂貴的鉑族金屬。基於氧化氫氧化鎳在從其分子結構中移入氫和除去質子的高表面活性，氧化氫氧化鎳的奈米薄片在作為甲醇氧化反應的觸媒時效率尤佳。因此，提供一嶄新之嵌入有相當多觸媒之厚電極，可獲致電流密度為 5、10 或 20 安培/平方公分之燃料電池，而與其他電能來源從事商業上之競爭。

本發明之厚電極直接反應燃料電池的一項重要特點，在於導入電解液的交叉流動，此交叉流動是在一厚而多孔的電極內，以橫向於燃料電池之電極間的電解液之流動的方向而流動之電解液。流通的多孔電極（flow-through porous electrodes），其與交叉流動電極（cross-flow electrodes）具有某些相似性，已使用於電解槽的恢復與除去電陽性（electro-positive）之金屬（例如：銀、金、銅、汞）和其他用途；但是，它們從未使用於賈法尼電池（galvanic cells），例如燃料電池，以促進其氧化還原反應。在燃料電池中的電解液的交叉流動，現已支援電極內部整個為觸媒所浸潤的整個部分的氧化還原反應，而不是如傳統燃料電池之侷限於薄薄的反應區上。

為了在相較於'747 號專利中之直接反應燃料電池（DRFC）電極，或使用於先前技術中之任何燃料電池之電極，其電極厚度均高出甚多的厚電極直接反應燃料電池（TEDRFC）的多孔電極內進行高水準的催化氧化還原活動，本發明利用了燃料及氧化劑與電解液的氣溶膠混合物的獨特性質的優點。燃料和氧化劑以其氣相而被作為細霧

化之電解液水霧的載體。當被導入至各自的電極時，燃料或氧化劑已臻飽和之電解液的微觀液滴以交叉流動移動通過電極，並被一薄液膜覆以高度分散的觸媒表面。

因此，本發明的第一個優點，在於透過提供厚而密集的觸媒多孔電極，而提供一就'747 號專利加以改良之強力的直接反應燃料電池（DRFC）。

本發明的第二個優點，是提供一具有較傳統燃料電池更厚之多孔電極的直接反應燃料電池，以容納總數量較先前技術之電極的可用者更多的觸媒表面，而增加體積電極電流密度（安培/立方公分）。

本發明的第三項優點，是提供一具有燃料或氧化劑的交叉流動的燃料電池，以提供比先前技術的電極所能達到者更高的橫切面電極之電流密度（安培/平方公分）。

本發明的第四項優點，是提供具有至少 250 微米厚之交叉流動電極的燃料電池。

發明的第五項優點，是減少在燃料電池的多孔電極內的觸媒表面的液體電解液膜的厚度，以促進快速的離子交換、反應產物的吸附和脫附（adsorption and desorption），以及燃料或氧氣的初始飽和度（initial saturation）。

本發明的第六項優點，是提供一燃料電池，其配置以在電極之間循環之泰勒渦旋流（TVF）及圓形庫頁特流（CCF），以快速除去反應產物與中和過量之離子。

本發明的第七項優點，是提供一種燃料電池，其包含以流經一個電極的電解液之交叉流動來輸送燃料或氧化劑的氣溶膠混合物的裝置。

本發明的第八項優點，是提供一種操作燃料電池的方

法，其包括以流經一電極的電解液交叉流動而輸送燃料或氧化劑的氣溶膠混合物的步驟。

這些優點將透過以下對本發明之之較佳實施例之描述，更充分地加以說明。

【實施方式】

本發明中的厚電極直接反應燃料電池（以下簡稱「TEDRFC」）是就發明人的'747 號專利所做之改良。'747 號專利中的燃料電池利用 TVF 避免燃料和氧化劑的越區現象，而免除了對質子交換膜（PEM）的需求。參考'747 號專利中的第 1A 圖，該圖為發明人之直接反應燃料電池（DRFC）之橫向面之部分視圖。電解液透過電解液輸入管 26 注入位於陰極電極固定圓柱 12 多孔內表層 14 與和陽極電極旋轉圓柱 18 多孔外表層 20 之間的電解液室 24。電解液在該圓柱狀燃料電池 10 內以軸向方向流動形成 TVF 54，並經由電解液排出管 26 離開電解液室 24。

如'747 號專利中之第 1B 圖所示，TVF 54 產生與從陰極多孔內觸媒表層 14 延伸進入電解液室 24 的觸媒突起發生交互化學作用的 CCF56。電解液並未穿透至陰極電極圓柱 12 或其多孔金屬網 30 至任何可觀之深。'747 號專利的第 5B 圖說明了電解液之 TVF 54、電解液之 CCF 56 及陰極電極 12 之組件之間的關係。

參考本說明書之第 1A 圖，本發明之厚電極直接反應燃料電池 10（以下簡稱「TEDRFC 10」）包括一個多孔圓柱狀陰極 12，其具有固定於金屬框架 16 之內表面 14，且與一個具有外表面 20 的多孔陽極 18 分離。該圓柱狀陽極係作為旋轉軸 22 之旋轉軸承。表面 14、20 以電解液間隙或

電解液室 24 分離，該電解液室具有電解液輸入管 26 以及電解液排出管 28。在本實施例中，輸送在該電解液室 24 之陰極電極 12 與陽極電極 18 之間之電解液的裝置，包括輸入管 26 與電解液排出管 28，其設置於具有供應與處理電解液之平衡系統（BOP—未顯示）的流體迴路（fluid circuit）中。

由於在此實施例中，圓柱狀陰極 12 是固定在電池 10 的金屬框架 16 上，其無法轉動（角速度 $\Omega_2=0$ ）。不像發明人之'747 號專利的圓柱狀陰極電極 12，該 TEDRFC 的陰極電極並不需要如 DRFC 的多孔內觸媒表層 14（參照發明人之'747 號專利），因為在該 TEDRFC 10 中，觸媒是透過過陰極 12 的內部而分散。

圓柱狀陽極 18 在固定圓柱 12 的內部圍繞著軸 22 而旋轉（角速度 $\Omega_1 \neq 0$ ）。也如同圓柱狀陰極電極 12 一般，由於觸媒是透過陽極 18 的內部而分散，該陽極電極的旋轉圓柱 18 亦不需要多孔外觸媒表層。

於圖式中之圓柱狀電極 12 和 18 為右圓和同軸的；然而，這些屬並非條件，亦可使用其他類柱狀（cylinder-like）的幾何形狀（例如：橢圓形、錐形、雙曲線、不規則狀，不同軸）。此外，建構一內柱 18 係固定，而外柱 12 為旋轉，或兩個圓柱以不同速度或方向旋轉的 TEDRFC，亦屬可行。所有的要件僅需電極 12 和 18 係相對於另一電極旋轉，而在電極 12 和 18 之間有一旋轉速度差，使得 $\Omega_2 \neq \Omega_1$ 即可。一個旋轉相對於其他使電極 12 等，此外，電極 12 和 18 二者之一均可為內部或外部電極，或固定或旋轉，只要 $\Omega_2/\Omega_1 \neq 1$ 即可。

固定圓柱 12 的內陰極表面 14 有一半徑 r_2 。旋轉圓柱 18 的外陽極表面的 20 有一半徑 r_1 。電解液室 24 具有一間隙寬度 $d = r_2 - r_1$ ，該間隙係形成於具有半徑 r_1 、 r_2 的表面 14、20 之間。

如'747 號專利之說明， Ω_2 、 Ω_1 、 r_2 與 r_1 之值如該專利之第 1A、1B 及第 2 圖中所教示，旋轉電極 12、18 中之一電極，使其相對於另一電極 18，12 而旋轉，將會在電解液室 24 以軸 60 為軸心產生 TVF 54 和高剪切速率 (high-shear-rate) 的 CCF56。圓柱狀突起 62 之高度 h 具有★半徑（如發明人之'747 號專利所述）之圓頂從陰極內表面 14 延伸進入 CCF 56，而在陰極 12 內產生從陰極 12 吸引電解液和反應產物進入 TVF 54 的差壓。TVF 54 在其以如 AE 箭頭所示方向軸向移動通過電解液室 24 時，圍繞軸 60 旋轉。陽極 18 的表面 20 亦有延伸進入 CCF 54 的突起 62，且發揮如陰極突起 62 的相同功能。

氧化劑和電解液之混合物的交叉流動如第 2 圖之箭頭 A_O 所示，係橫向於電極 12、18 之間如箭頭 A_E 所示的電解液流動。氧化劑與電解液的混合物，其含有反應產物，例如以粒子和氣泡 64 的形式之蒸氣與析出物。粒子和氣泡 64 被 CCF 56 吸引進入 TVF 54 的中心，並在該處維持被捕集狀態，直到通過電解液排出管 28。粒子和氣泡 64 接著進入平衡系統 (BOP)，在該處藉由過濾除去粒子，而水則經處理以供重複利用或排出。電解液室 24 之電解液接著透過平衡系統不斷地回復至標稱化學成分 (nominal composition)，以保持最佳性能。

在本實施例中之電解液為氫氧化鉀 (KOH) 水溶液，

但亦可使用其他電解液（如鹼、酸、有機性、碳酸鹽、熔態等）

如前所述，電解液室 24 係與平衡系統（BOP）、供應電解液之電解液輸入管 26 與排出電解液之電解液排出管 28、未反應之燃料或氧化劑、進入 BOP 之水和反應產物（未顯示）。BOP 可包括：起點泵（source pump）與推動電解液通過電解液室 24 的水槽泵（sink pump），此二者可以同步，以使得其共同以脈衝（pulse）或推進方式輸送電解液，並在電解液室 24 提供適當的差壓，以協助在陰極 12 和陽極 18 電極之間的電解液中輸送電解液的 TVF 54 之軸向流動。

本發明的一個重要特徵，是輸送電解液和燃料或氧化劑混合物的交叉流通過電極 12、18 之一或二者的裝置。在此實施例中，氧化劑歧管 30 係位於金屬框架 16 與多孔陰極 12 的外表面之間。氧化劑輸入管 32 係在流體中與一組延伸進入氧化劑歧管 30 的噴霧器噴嘴 34 相連通。氧化劑輸入管 32 可連接到氧化劑與電解液之混合物的來源（未顯示）。

在鹼性化學，某些由陽極產生並從平衡系統清除的水被加入氧化劑和電解液的混合物之中。在酸性化學，水的路徑則是相反的。

較佳的氧化劑包括淨化空氣、氧氣或如過氧化氫之液體，視燃料和電解液的選擇而定。氧化劑-電解液混合物透過噴霧器噴嘴 34 而破壞氧化劑-電解液混合物，成為主要由含有微小液相顆粒的氣相所構成的細薄霧，而輸送至氧化劑歧管 30。該薄霧如箭頭 A₀ 以噴灑之交叉流動進入相鄰於

噴嘴 34 的陰極 12。

氧化劑-電解液薄霧，以箭頭 A_O 所示的交叉流動路徑穿透含有被嵌入之觸媒粒子的多孔陰極 12。使得觸媒粒子的表面被塗布以一非常薄的電解液液體薄層，該電解液液體薄層先被氧化劑所穿透，隨後被反應產物和離子所穿透。此一交叉流動是以橫向於電解液室 24 之由電解液輸入管 26 到電解液排出管 28 之旋轉軸 22 而軸向移動的方向而穿透，如箭頭 A_E 所示。該等流動並無需要與電極表面 14-電解液室 24 介面成正直角 (90°)；然而，較佳者為氧化物混合物流動應與電解液流動 A_E 至少呈 45° 。

氧化劑混合物流動（如箭頭 A_O 所示）透過包含多數個嵌入陰極 12 之毛孔內的觸媒粒子的多孔陰極 12 而移動。該等觸媒粒子可為發明人於 2010 年 12 月 30 日提出申請之美國第 2010/0329947 號專利申請案或 '747 號專利所揭露者。在本實施例中，大多數—如果不是幾乎所有的話—陰極 12 的毛孔均含有一或多個觸媒粒子。氧化劑-電解液混合物流動隨後參與三相（觸媒-氧化劑-電解液）之還原反應，以藉由從水中萃取 H^+ 陽離子而產生羥基陰離子 $(OH)^-$ 。 $(OH)^-$ 陰離子被保留在鹼性電解液。在酸性電解液中， $(OH)^-$ 陰離子與 H^+ 陽離子結合，以產生水（蒸汽），而留下過量之鹽陰離子（如 $(PO_4)^{-3}$ ）。陰離被交叉流動（如箭頭 A_O 所示）席捲至陰極 12 的內表面 14。

與電解液混合的高能量含量燃料經由燃料輸入管 36 進入 TEDRFC 10（來自於一未顯示之來源）。燃料—電解液混合物並透過旋轉器 40，以及延伸進入位於旋轉圓柱狀陽極 18 內的燃料歧管 38 內的一組噴霧器噴嘴 42，而通

過並進入燃料歧管 38，旋轉圓柱狀陽極 18 係安裝於旋轉器 40 上。

較佳之燃料列舉於'747 號專利中，其包括：

- 烷類（烷烴）：甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、辛烷；
- 醇：甲醇、乙醇、丙醇、丁醇；
- 煤油（kerosene）；以及
- 硼氫化物：硼氫化鋰（ LiBH_4 ）、硼氫化鈉（ NaBH_4 ）及硼氫化鉀（ KBH_4 ）。

這些燃料是易於使用的氣體、液體或粉末，可溶解於電解液液體，並透過噴霧器噴嘴 42 而散佈。

燃料-電解液混合物被破碎成細水霧。本發明的燃料可被來自於燃料電池反應的熱所加熱，以將之轉化為氣態。燃料-電解液混合物如靠近噴嘴 42 的陽極 18 的橫切面之箭頭 A_F 所示，被噴灑至陽極 18。在本實施例中，噴霧器噴嘴 42 係隨陽極 18 而旋轉；然而，它們可以其他速度旋轉，或以固定速度旋轉。

燃料-電解液混合物之水霧滲穿過於毛孔內含有多數觸媒粒子的多孔陽極 18。每個觸媒粒子表面被覆以非常薄的電解液液體薄層，該薄層係先為燃料所飽和，隨後與反應產物和離子形成飽和。該觸媒粒子可為發明人之'947 號專利申請案或'747 號專利中所揭露者。該等粒子亦可包含如發明人之'080 號專利所述「法拉第材料」(faradic materiass)之羥基氧化鎳/氫氧化鎳（ $\text{NiO}(\text{OH})/\text{Ni}(\text{OH})_2$ ）的法拉第奈米薄片（faradic nanoflakes）；但在本發明中，該等粒子係作為碳氫燃料之氧化反應之觸媒。由於觸媒粒子輕易地從烴類分子吸附氫原子，並釋放在兩個價態之間迅速振盪的

質子，這是一個觸媒暫時參與氧化還原反應的例子。在本實施例中，大多數—如果不是幾乎所有的話—陽極 18 的毛孔均含有一或多個觸媒粒子。燃料-電解液混合物流動以如箭頭 A_F 所示之流動路徑移動。此一穿透的方向係由電解液從電解液輸入管 26 進入到電解液室 24 中相對於旋轉軸 22 軸向移動，而至電解液排出管 28 的方向（如箭頭 A_E 所示）之交叉流動的方向。

交叉流動亦如第 1A 圖中之橫向箭頭 A_F 和 A_E 所示，在陽極圓柱 18 中的燃料混合物流動（如箭頭 A_F 所示）為橫向於在電解液室 24 中的電解液流動（如箭頭 A_E 所示）。該等流動並無需要成正直角（ 90° ）；然而，較佳者為燃料混合物流動應與電解液流至少呈 45° 。

燃料-電解液混合物交叉流動 A_F ，接著參與三相（觸媒-燃料-電解液）的氧化反應，以在陽極 18 內產生氫陽離子（ H^+ ）或質子。過量之 H^+ 陽離子在酸性電解液將交叉流動移向陽極外表面 20，在該處與 CCF 56 電解液結合。在鹼性電解液，（ H^+ ）陽離子首先結合 $(OH)^-$ 陰離子，以製造水蒸汽。過量來自電解液（例如氫氧化鉀（ KOH ））之鹽的陽離子（例如 K^+ ）將交叉流動向陽極外表面 20 移動，在該處與 CCF 56 結合。

以類似的方式，過量的陰離子（例如鹼性電解液的 $(OH)^-$ 或酸性電解液的 $(PO_4)^{3-}$ ）在陰極 12 內將交叉流動 A_O 移向內部陰極表面 14，在該處與亦包含陽離子的 CCF 56 電解液結合。一旦釋放進入 CCF，這些協調離子，無論是在酸性或鹼性電解液，即同時並迅速地被在陽極 18 的外表面 20 與陰極 12 的內表面 14 之間的 TVF 54 所席捲，在該處該等

離子形成一個非常密集的離子電流，因為其互相中和。

在以上所述的陽極與陰極方法中，水以蒸汽的形式以及燃料以氣態形式存在，係透過控制溫度及壓力的裝置調節在液體/蒸氣壓平衡。這些裝置可包括洩壓閥（pressure relief valves）、泵浦、酸鹼度感測器（pH sensors）以及平衡系統中的溫度計。

當霧化的電解液和氣態燃料或氧化劑之混合物進入多孔電極 12、18 之任一電極時，液相形成一個覆蓋了整個可用的觸媒表面的薄膜。本發明的厚電極，其觸媒表面積較傳統電極之可用面積大幅地增加。其中一個結果是，液膜（liquid film）的厚度隨著增加的觸媒表面面積而減少。「電解液-燃料」或「電解液-氧氣」溶液的厚度減少，促進了燃料或氧氣透過一極薄之飽和電解液膜的快速離子交換（吸附和脫吸）。該薄膜可容許醇類以類似於氫在觸媒表面的方式反應。當以提高溫度和壓力來增強時，更薄的層大幅地降低了氧還原反應（ORR）的過電壓。

陽極 18 的薄膜在交叉流動的差壓和離心力下緩慢向電解液室 24 移動。類似的氧氣/電解質薄液膜及霧化氣流藉由在氧化劑歧管 30 與電解液室 24 之間的差壓推動而通過陰極 12。

同樣的說明亦適用於燃料電池 10 的鏡像，其中電極 18 為旋轉陰極，而電極 12 為一固定陽極。發明人的'747 號專利說明了如何在一個共同軸線上連接燃料電池 10 與其鏡像之燃料電池，以免除將集電環和集電刷組件 50 與電極 12、18 連接於外部電力負載 46 的需求。同樣的配置也應用於 TEDRFC。

承上關於燃料電池之運轉的說明，一鹼性（例如：氫氧化鉀）電解液燃料電池將陽極 18 的富氫燃料（hydrogen-rich fuel）轉化為質子(H^+)，其與 $(OH)^-$ 相結合而成為在陽極 18 的蒸汽。在熱平衡的蒸汽與交叉流動的氣體，以及含有過量 K^+ 離子的液體電解液被一向電解液室 24 的差壓所驅動。從陽極外表面 20 所排放出，並含有其他氣體產物（如 CO_2 ）的蒸汽（ H_2O ）氣泡 64，並被 TVF 電解液所捕集。CCF 56 同時加快了 K^+ 陽離子和 $(OH)^-$ 陰離子以極高之速率轉移，該等速率是 PEM/MEA 燃料電池所無法達到的，因為在 PEM/MEA 燃料電池，離子只會在電極間以低擴散、分散、遷移和濃度梯度而移動。

陽離子的陰離子分別在陽極 18 的外表面 20 和陰極 12 的內表面 14 之間移動表面，其中， K^+ 陽離子與 $(OH)^-$ 離子結合，以恢復鹼性並中和過量的離子濃度。在表面 20 和 14 上的過量離子的中和支持了新產生的離子以濃度梯度的方向流向這些表面。由於 CCF 56 的非常高的速度和化學計量條件，TEDRFC 10 的電流、功率和能量密度均可達到數量級，這是未使用 TVF 的燃料電池所不可能達成的。

如發明人之'747 號專利所教示，蒸汽氣泡—其與其他來自於反應產物（如二氧化碳氣泡）64（參照第 2 圖）及未反應燃料或氧化劑的氣體氣泡被吸引到 TVF 54 的中心。TVF 54 清除掉來自於兩個電極的蒸汽和二氧化碳氣泡 64，以及氣態反應產物，但藉由在渦旋中心內保持氣體，而仍保留其本質上不能壓縮的液體性質。如果軸向電解液的體積流量（volumetric flow）超過總氣流量至少 3:1，較佳者為 10:1，這是可能的。氣泡和氣體仍被捕集在 TVF 54

之內，直到軸向移動的 TVF 54 經由電解液排出管 28 被排出，並透過平衡系統（BOP）從 TEDRFC 10 除去。

在蓄電池和燃料電池，電流密度（electrical current density）是電極間的離子交換速度的函數，其可以藉由體積單位過量離子莫耳濃度 M 而測得，其中， i 安培/平方公分 = M 莫耳/毫升（其中 F = 法拉第常數 = 96,485 庫倫/莫耳）乘以一有效的體積流速， v 毫升/平方公分-秒或公分/秒。在質子交換膜（PEM）及類及的薄電極反應區，過量離子在接近電解液-電極的介面產生很大的表面效應。

在 TEDRFC 的電極，當在霧化的電解液中的燃料或氧化劑進入多孔電極 12、18，並在其到達與電解液室 24 之介面的表面 14，20，交叉流動之電解液累積額外過量離子的莫耳濃度時，過量的離子開始產生。此處，過量離子濃度莫耳數值在名義上是 M ，電解液交叉流動的速度為 v ，而電流密度 $i = MvF$ 安培/平方公分。

無論在電解液/燃料/氧化劑化學，過量的離子在陰極 12 總是陰離子，而在陽極 18 則為陽離子。在 TEDRFC，這些離子主要是以雙電層（electronic double layer，簡稱“EDL”）的形式在觸媒表面上。在燃料、氧化劑、反應產物和離子以雙向穿越數個漢姆茲層（Helmholtz layers），進入一擴散及在觸媒粒子上方通過的電解液之切向剪切層流邊界層（tangential shear flow boundary layer）。在 EDL 的固有電動能電位（electrokinetic energy potentials），可在透過塊狀電極（bulk electrode）與交叉流動之電解液來移動過量離子時用以提供協助。

一般而言，在中央旋轉電極 18 的過量電荷會被呈放射狀地向外推動，而在固定的封閉電極內的過量電荷則會被呈放射狀地向內推動。這些帶有可耦合電場和磁場的電動電位 (electrokinetic potential) 可用以配置來將離子向較佳之方向推動。

不論從分析或是實驗的角度來看，厚電極直接反應燃料電池的電極的電動能都是極為複雜的，因此本文不擬就此詳述。關於電動離子傳輸的優秀參考文獻，可參閱 Delgado 等人所撰之《電動能現象的測量及解釋》(Delgado et al, *Measurement and Interpretation of Electrokinetic Phenomena*, Pure Appl. Chem., Vol. 77, No. 10, ©2005. pp. 1753-1805)

一個便利於加速過量的帶離子 (ion-bearing) 電解液通過電極 12、18 的裝置，是利用電聲動能。Delgado 等人在上述引據文獻第 4.6 節，第 1784 頁首段即教示了聲波激發 (acoustic excitation) 是如何能夠在沒有干擾粒子 (如觸媒粒子) 的情況下在流體中引起非常小的週期性之電荷位移。

在電極 12、18 產生電聲動能的壓電式電聲換能器 (Piezoelectric electroacoustic transducers) 58，如第 1A 圖所示，係連接到電極 12、18 的終端。換能器 58 是由一個從燃料電池 10 或一透過滑環和電刷 (未顯示) 連接之外部波形電源獲得電力之集成波形電源供應器 (未顯示) 所驅動。

一個可控的聲波透過溶解的離子振動產生一個交流電流 (AC current) 和磁場。如果氣流量不足，該磁場可連接於一驅動力 (例如：可在陽極室 38 和陰極室 40 內裝置永

久磁鐵或可程式化感應線圈與磁極，未顯示），以將電解液推向電解液間隙 24。

旋轉電極 18 藉由自由電荷電流迴路感應而產生自己的磁場。具有本質上穩定之力場的電動電位可以加以控制，並用以對選定的離子物種，以一種類似電泳(electrophoresis)的方式向一較佳的方向施以驅動力；特別是在永磁流體動力的附加影響之下。

如甲烷、醇類、煤油的碳氫燃料，以及硼氫化鈉，此二者都在每單位重量和單位體積具有高能量密度。例如，根據其各自可逆的吉布斯自由能 (Gibbs free energies)，甲醇可在 700 千焦耳/莫耳 (KJ/mole) 下產生 1.21 伏特及 6 個電子，而硼氫化鈉可在 1271 千焦耳/莫耳下提供 1.64 伏特和 8 個電子。然而，由於在質子交換膜所需的低溫、酸性電解液，碳氫化合物及硼氫化鈉的氧化觸媒反應相當緩慢，因此，在先前技術及發明人的'747 號專利之前的直接反應燃料電池均無法獲得這些產量。

碳氫化合物和硼氫化鈉的厚電極直接反應燃料電池可以產生相當高的功率和能量密度，因為鹼性電解液可用以減少極化 (polarization) 和觸媒污染 (catalyst poisoning) 的現象。這在發明人的'747 號專利之前的傳統直接反應燃料電池(DRFC)是不可能的，因為沒有耐久的與鹼性電解液相容的離子交換膜可用以避免燃料-氧化劑在高功率燃料電池的越區 (crossover) 現象。

如果三相反應是瞬間的，傳統質子交換膜燃料電池的薄膜電極組件 (MEA) 之反應區對性能的限制將會較少，但事實並不然。若離子在反應區的駐留時間低於反應進行

完成所需的反應時間，則將會造成燃料或氧化劑的浪費，且會殘留不良中間反應產物而污染反應區。在發明人的TVF/CCF燃料電池中之反應區，其較膜電極組件（MEA）的反應區為厚，且可輕易地提供超過反應時間的駐留時間。因此，僅有極少之浪費的燃料或氧化劑會到達電解液室 24。

電解液與由燃料和氧化劑所構成群組中的一種氣體的氣溶膠混合物，其飽和霧化液滴透過電極 12、18 的至少一個電極而交叉流動，並在觸媒表面形成一個極薄的塗層。這是一個非常理想的化學程序反應動態。

V.S. Bagotsky（編者）在《電化學基礎》，第二版，（*Fundamentals of Electrochemistry*, 2nd Edition, John Wiley, ISBN 13 978-0-471-70058-6, ©2006, §4.4 “Convective Transport”, p. 61）一書之第 4.4 節「對流運輸」（convective transport）中闡釋了對流運輸，並對薄液膜氣溶膠混合物的厚度 δ ，以速度 v 流經表面時，提供了一個「擴散比率和最大對流通量」的估計值 $J_{d,j}/J_{kv,j} \approx D_j/\delta v$ ，其中對典型電解液而言，其 D_j 為 10^{-5} 平方公分/秒 (cm^2/sec)，而 v 為大約 5×10^{-2} 公分/秒 (cm/sec)。液膜氣溶膠混合物的厚度 δ ，可大約為 $(0.1 \times D)/(3.6 \times T_f)$ ，其中 D 為一粒子、觸媒或支架之標稱直徑（nominal diameter）， T 為以公分之小數值計（in fractional cm）之電極厚度，而 F 為一相對於多孔流體動力學的流量係數，其估計值約為 0.5。

由於液膜厚度， δ ，是粒子直徑的一小部分，或不超過厚度為 2 mm 之電極的 $1/3D$ ，當氣體對液體體積的比值為 4:1 或更高時，通過薄膜的擴散將會比透過電極的對流運輸

還要高。因此，輸送氣溶膠混合物的裝置應包括透過電極 12、18 的一個電極而將氣體-電解液在氣溶膠混合物的交叉流動的體積比控制在至少 4:1 的裝置。

4:1 或更高的氣溶膠混合物比值不能獨立於其他系統變量而加以維持。此外，燃料電池（10）必須進一步包括在該氣溶膠混合物進入電極（12, 18）中的至少一個電極時，使該氣溶膠混合物之體積，以及該氣溶膠混合物電解液之莫耳濃度與由燃料和氧化劑所構成群組中的至少一種氣體至少維持化學計量平衡的裝置。

一般而言，化學計量平衡是由一個控制系統而加以維持，該控制系統包括測量蒸氣蒸汽壓力、電解液蒸汽壓力、燃料體積和氧化劑質量流的裝置。來自於燃料電池反應的熱產生蒸汽壓，該蒸汽壓可用以建立基本之系統工作溫度及壓力，以及均衡之電解液濃度。以液體儲存於 100% 濃度的燃料可被明確地測量。氧氣必須被加以測量並控制為質量流動的成分。其他變量（variables）應透過包含電池之電壓與電流的控制系統予以監測。

控制系統必須能夠控制氧化還原反應變量，以便有足夠的時間反應，而使每平方厘米的電極-電解液介面的觸媒表面密度達到接近 10^5 cm^2 。如果電解液的抽取速度太慢，則燃料電池 10 的電流輸出將受到限制。如果抽取速度太快，則電極 12、18 將被凝聚的電解液液滴所浸潤。透過維持最低 4:1 的氣體對液體的體積比，基於表面張力，實際上確保了氣溶膠混合物的毛細管半月板薄層附著於內部的親水性分散電極表面。

150 至 250°C 的標稱工作溫度 (nominal operating temperature) 將確保以上面列舉之燃料以及其他氫之實際來源的氣體狀態。例如在 250°C 的略高於甲醇和乙醇之臨界值的工作溫度，這些燃料在任何壓力下均從液體成為氣態。這個溫度將提供幾乎完整的陰極和陽極之氧化還原反應。

甲醇和乙醇燃料的相關性質：分別為 240°C，於 1,154 磅/英吋 (psi) 和 0.2722 克/立方公分，或 8.5×10^{-3} 莫耳/立方公分；以及 243°C，於 926 磅/英吋 (psi) 和 0.2755 克/立方公分，或 6×10^{-3} 莫耳/立方公分。如一個可能的例子，40% 的氫氧化鉀電解液在 250°C 有一個相應的蒸氣壓為 22 大氣壓 (atm)，或 323 磅/英吋 (psi)，以及 0.5596 克/立方公分與 1.43×10^{-2} 莫耳 / 立方公分的質量和莫耳密度。在 22 個大氣壓 (atm) 下，水蒸氣和二氧化碳氣體從平衡系統的釋放，將使氫氧化鉀 (KOH) 維持在 250°C 的溫度和 40 % 的濃度。將排出氣體利用熱交換加以冷卻以保留其部分熱含量 (enthalpy) 作為其他用途，將會產生可循環利用，並經再加熱而將供應氧氣予以濕潤的蒸餾水 (distilled water)，如上所述，其為一個必需的消耗品。

甲醇和乙醇的吉布斯值 (Gibbs values)，分別為大約 700 和 1325 千焦/莫耳。假設一個保守的轉化效率 (conversion efficiency) 為 60%，可傳送的功率值為 420 和 927 千焦/莫耳。這可能是一個比乙醇所能達到者更高的轉化效率，因為可實現乙醇可能需要的較高溫度，以在完全氧化為二氧化碳之前打破共價碳雙鍵。

鑑於上述計算的莫耳濃度，一個 10 安培/平方公分的額定電流密度，分別對應於甲醇和乙醇的 1.9×10^{-5} 和 8.63×10^{-6}

莫耳/秒-平方公分或 7.6×10^{-3} 和 4×10^{-3} 公分/秒。後者之數值代表進入陽極 18 之背面的燃料供給速度。此外，必須添加足夠的氫氧化鉀 (KOH) 流動，以支持在所有電極深處的氧化還原反應。這將需要對每一莫耳的甲醇提供至少 6 莫耳的氫氧化鉀，而對乙醇的 12 個電子則需 12 莫耳的氫氧化鉀。額外的數量將需要一個額外的 8×10^{-3} 或 16×10^{-3} 厘米/秒，分別為淨 1.6×10^{-2} 至 2.0×10^{-2} 厘米/秒。

在電極的空隙分率 (void fraction) 為 50% 時，這些燃料供給的速度在陽極 18 內會是先前估計值的兩倍。如果分別對甲醇和乙醇而言，通過 50% 的多孔陽極 18 的燃料/電解質混合物的速度是大約每秒 300 至 400 微米，或每秒 12 至 16 密耳 (mils)，則氣溶膠混合物完全移動通過一個 6 毫米厚的陽極 18 需要大約 20 或 15 秒。

在上述的例子中，甲醇燃料氣體的體積可比得上最小 40% 的氫氧化鉀的液滴體積；然而，乙醇的體積卻是在被選擇的電解液的羥基濃度的 4 倍之多。後者之比值僅在由氫氣和氧氣作為霧化之氫氧化鉀之載體氣體時始會被超越，其可更佳地霧化液體電解液。

對甲醇而言，相同或更高的氣溶膠混合物之氣體對電解液的體積比可透過利用更高濃度的氫氧化鉀 (KOH) 而達成。在氫氧化鉀的濃度為 80% 且 250°C 下，蒸氣壓下降約 4 個大氣壓 (atm) (60 磅/英吋, psi)，此蒸汽壓與濃度為 40% 的氫氧化鉀在約為 150°C 的較低溫度時相同。

蒸汽在濃度較高的氫氧化鉀或較低的操作溫度下的壓力-溫度之數據，將產生一個控制溫度和壓力，可允許選擇任何有優異霧化效果之進入電解液之燃料氣體或氧化劑的

氣溶膠混合物的體積比。對於使用甲醇燃料，並在每個投影電極面積產生 10 安培/平方公分 (A/cm^2) 的電流的燃料電池 10，一組合理的操作參數為：溫度為 250°C 的 60% 或 2.45 莫耳/毫升的氫氧化鉀 (KOH)，及 13.6 atm 的操作蒸汽壓力 (200 磅/每平方吋, PSI)。當液體速度下降到 3.26×10^{-3} 公分/秒，或一個合適的氣體對液體之霧化 (atomization) 比值為 3.66 時，氣體標稱進氣速度 (nominal gas entry velocity) 成為 11.95×10^{-3} 公分/秒。液體霧化的比例為 3.66。對於所有透過在 100 至 300°C 之溫度範圍下，於深處電極內發生之化學反應所產生的燃料或中間產物，水與反應產物仍維持在氣相，以支持氣溶膠流動。

除了電極厚度之外，觸媒粒子大小會成反比地影響燃料電池的性能。如果觸媒粒子具有一標稱特徵尺寸 (nominal characteristic size) D ，例如觸媒棒或球與以 50% 至 60% 的物質密度 (material density) (這是一個最佳的催化活性範圍) 封裝或燒結的觸媒粒子的封裝直徑，則每單位投影電極面積的活性表面積倍數是 fT/D ，其中 T 為電極厚度， f 是一個數字因子 (numeric factor)，其對固體粒子而言，大約為 2 (燒結) 至 3 (封裝)，或遠大於 RANEY[®] 粒子。

大約 3 奈米的鉑顆粒具有 100 平方公尺/公克 (m^2/gram) 的表面積。最先進的電極使用小於 $0.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 而曝露大約觸媒表面積的一半的碳載體鉑 (carbon-supported platinum)。因此，鉑觸媒的表面因子 (surface factor) 低於 250:1，但如前所述，鉑的表面所散布的體積密度非常的低，因此，並不適用以上的說明。

若一多孔電極之厚度為 1 公分 (10,000 微米)，並含有 10 微米的粒子，則其將具有大約為 2500:1 之倍數的表面因子。如果是使用較小的觸媒粒子，則表面因子將會顯著提高。此外，使顆粒更小的一個很重要的理由是，當聚合進入多孔結構 (porous structure) 時，孔徑與粒徑具有密切的關聯。當霧化且以氣體佔主導地位的電解液和由燃料和氧化劑所構成群組中之一的混合物進入多孔電極時，液相分佈在可用的表面，且液膜厚度隨著表面積的增加而減少一如前所述。

例如：用於甲醇與氧的鎳、銀或鍍金的二氧化錳 (MnO_2) 之觸媒粒子，其可分別輕易地獲得 10 奈米的粒子，而產生 1000 倍於 10 微米之粒子的表面積。這些更小的粒子可以支持奈米電解液膜的厚度。即使這些替代觸媒的特定催化表面活性具體催化不過是鉑的一小部分，但它們的有效結合的分子與離子加速傳送速率，以及擴大的觸媒表面可使電流和功率密度大幅增加。

一個開放的毛孔結構的導電流集流器具有 5% 的物質密度，但不超過 20%，且 200 奈米到 250 微米的毛孔尺寸可以提供結構支持並作為支架 (scaffold)，其中極小的觸媒粒子可被隔離並置於適當位置。市售的玻璃碳泡沫 (vitreous carbon foam)，化學鍍 (electroless-plated) 鎳或銀或注射成型 (injection molded) 和燒結 (sintered) 的顆粒混合物可輕易地被製造。尤感興趣者，為張氏等人於《三維雙連續超快充電-放電電池電極》 (*"Three-dimensional bicontinuous ultrafast-charge and -discharge battery electrodes"*, Nature Nanotechnology, Letters and Supplement, 20 March

2011) 一文中所描述的電極和電流集電支架結構。這些結構在 Braun 等人於 2010 年 3 月 18 日所申請之名為《可充電電池之多孔電極及製造該等電極之方法》(*"Porous Battery Electrode For A Rechargeable Battery And Method Of Making The Electrode"*) 的美國專利申請第 2010/0068623 號一案中被進一步加以說明。本發明可使用厚電極，其可利用在陽極的羥基氧化鎳 ($\text{NiO}(\text{OH})$) 奈米薄片上進行碳氫氧化 (hydrocarbon oxidation) 之結構，並在陰極的電鍍 (electrodeposited) 之二氧化錳具有供氧還原反應 (ORR) 的類似結構。

電流集流器之支持結構 (support structure) 或支架的表面並非主要的觸媒表面。主要的觸媒表面可透過在陽極以上述之任何類型或奈米級 (nano-scale) 的鎳粒子 (如 Raney[®] 鎳)，在陰極則以鍍銀、金的二氧化錳粒子而提供，此等粒子均可燒結於支架結構的開放毛孔。

由於 TEDRFC 10 是利用泰勒渦漩流 (TVF)，而非質子交換膜 (PEM) 來避免燃料或氧化劑通過電解液間隙 24 的越區現象，通過電極 12、18 的燃料與電解液的交叉流動即既可能又實際發生。交叉流動克服了先前技術在電極厚度上不得超過 200 微米以上的限制，此厚度遠低於質子交換膜。本發明的一個重要特徵在於，厚電極直接反應燃料電池 10 的電極 12、18，在電解液交叉流動的方向可為 250，500，1000，5000 或 10000 微米或甚至更厚，且更具有機械性的強度，但相較於厚度較薄且脆弱的膜電極組件 (MEA) 電極，成本卻更低。

此外，厚電極 12、18 可與相當多的觸媒封裝，以將氧化還原反應加速至膜電極組件的兩百倍或甚至兩百倍以上。這些因素促進了更高比例的燃料與氧化劑的轉換，因為可以暴露較多的反應部位（reaction site）以及反應時間較長，使得燃料或氧化劑的使用更完全，不良中間反應產物減少，並降低了燃料或氧化劑成本。因此，厚電極直接反應燃料電池 10 的電極表面 14、20 的電流密度可以低度的 I^2R 損耗達到每平方公分 5、10 或 20 安培，具有與其他電能來源相匹敵之商業競爭力。

厚電極可以奈米碳管（carbon nanotube，簡稱“CNT”）或雙電層（EDL）的材料建構，例如多壁奈米碳管（multi-walled carbon nanotube，簡稱“MWCNT”）與觸媒粒子混合，並以電路與物理方式與電極 12、18 接觸。這些多壁奈米碳管具有非常高的電場充電和放電率，可用於構建人稱「超級電容器」（supercapacitors）之獨立電能儲存元件。在厚電極直接反應燃料電池中，透過電解液的交叉流動，EDL 材料帶有電荷，故可以提供額外的突波電流，以滿足突然增加的負載。碳富勒烯（Carbon fullerenes）可與電解液流動，因為其會透過各自的電極吸附並攜帶多餘的自由離子，以增加 EDL 的效果。含碳離子在進入 TVF 54 時被中和，並可發生與通過任一電極相同的功能。這在質子交換膜（PEM）燃料電池是不可能的，因為此等電池無法容許燃料或氧化劑的交叉流動。

TVF 54 也免除了任何電解液儲存之質子交換膜的需求，並避免了燃料或氧化劑的越區現象。TVF 54 除去了質子交換膜（例如：Nafion® 聚合物薄膜）之大約為 190 °C 的

最高工作溫度限制。較高的溫度促使低成本的鎳基觸媒 (nickel-based catalysts) 被用以取代在質子交換膜燃料電池所需的昂貴之鉑族金屬。

由 200 至 400°C 的工作溫度可促使濃縮甲醇或類似之高密度燃料在使用低成本觸媒 (例如：銀、鎳、錳、鈷和鐵) 時，有高達 98% 的化學能轉換成電能，因而免除了昂貴的鉑族金屬觸媒的需求。此外，至少 300°C 的溫度消除了 0.4-0.5 伏特的過電壓 (overvoltage) (33% 的能量)，不論有無觸媒，此通常是在較低的質子交換膜之溫度下的氧還原反應 (ORR) 中所損耗。此外，藉由在醇氧化反應區 (alcohol oxidation reaction zone) 產生甲醛或甲酸，能量不致損失。

由於 TEDRFC 10 沒有任何的質子交換膜 (PEM)，因此無需為了避免損壞質子交換膜而加燃料加以稀釋。此外，可使用不會腐蝕金屬電極的鹼性電解液，且簡化了去除水的程序。不會因為產生質子交換膜的機械性故障的風險，也不會因磨損而產生任何質子交換膜的漏損 (leakage)。

厚電極直接反應燃料電池亦以較傳統燃料電池 (例如甲醇直接反應燃料電池) 為高的能量轉換效率運轉。由 Skowroński 等人，在《以鎳泡沫基之氫氧化鎳/羥基氧化鎳電極作為鹼性溶液之甲醇氧化之觸媒系統》(“Nickel Foam-based (Ni(OH)₂/NiOOH Electrode as Catalytic System for Methanol Oxidation in Alkaline Solution”, ©2006, J. New Mat. Electrochemical Systems, Vol.9, pp. 345-351) 一文中，說明了傳統甲醇直接反應燃料電池的峰值電流是如何受到會阻礙

甲醇氧化的進一步反應的形成於羥基氧化鎳 (NiOOH) 顆粒之細孔中的低聚合物膜 (oligomer film) 的過量厚層的結構的限制 (第 349 頁, 第 I、II 段, 31-33 行), 而此等情形不會發生在厚電極直接反應燃料電池。

低聚合物膜在傳統的甲醇燃料電池形成於整個電極的理由, 在於在傳統的燃料電池中促進離子遷移的主要力量是擴散梯度 (由電極內的電荷力所引起)、分散梯度 (由溶質在溶劑中的混合所引起)、遷移梯度 (由電極間的電荷力所引起) 和濃度梯度 (造成溶質在溶劑中的不均勻莫耳數)。這些都是相對較小的力量, 無法避免中間反應產物如... 甲醇氧化的惰性產物 (passive product(s)) 之阻擋含有羥基氧化鎳 (NiOOH) 之觸媒成分的電極表面 (Id., 第 351 頁, 第 I、II 段, 15-46 行) 之附著於電極。在厚電極直接反應燃料電池 (TEDRFC), 相當強力的通過陽極 18 的電解液-甲醇交叉流動的對流力 (convection forces) 將掃除甲醇氧化反應的中間產物, 例如甲酸 (formic acid) 和甲醛 (formaldehyde), 並避免低聚合物膜的形成。

厚電極直接反應燃料電池 10 經運轉產生傳輸電力, 透過陽極終端電器 44, 經由外部電路負載 46 到達陰極終端電器 48, 係經由包含下列步驟的方法:

- i. 透過電解液輸入管 26 將電解液輸送至電解液室 24, 成為流動 A_E ;
- ii. 將氧化劑與電解液之混合物輸送至入氧化劑輸入管 32, 並透過噴霧器噴嘴 34 在氧化劑歧管 30 形成薄霧, 接著交叉流動 A_O 經由陰極 12 進入電解液室 24;

iii. 燃料與電解液之混合物輸送至燃料輸入管 36，並透過噴霧器噴嘴 42 在燃料歧管 38 形成薄霧，接著交叉流動 A_F 經由陽極 18 進入電解液室 24；

iv. 供應電力予電動馬達驅動裝置 52，以使一圓柱 12、18 以 $\Omega_2 \neq \Omega_1$ 之速率相對於另一圓柱 18、12 旋轉，且該速率足以在該電解液室 24 之流動 A_E 內產生 TVF 54 及 CCF 56，使得陽離子和陰離子在電極表面 14，20 反應以形成水蒸氣，該水蒸氣與其他反應產物（例如：二氧化碳）、未反應之燃料和未反應之氧化劑被電解液的泰勒渦旋流 54 所捕集；且

v. 從電解液室 24 排出含有水與其他反應產物（例如：二氧化碳）、未反應燃料與未反應氧化劑的電解液。

如同發明人之'747 號專利的直接反應燃料電池 10，陽極 18 的產生電子 (e^-)，該電子從陽極 18 經過一集電環及集電刷組件 50 至連接至外部電力負載 46 之一終端的絕緣的終端電器 44 (-)，外部電力負載 46 的另一終端連接終端電器 48 (+)，此終端固定於連接至陰極 12 的金屬框架 16，在陰極 12，電子 (e^-) 參與了氧化劑的還原反應。

一般而言，電極表面 14 和 20 是共同延伸的 (coextensive)。在電解液室 24 內互相面對的表面 14，20 之間的間隙 d 可藉由賦予其中一個或兩個表面略微圓柱-圓錐的形狀 (未顯示) 而有所改變，其目的是在容納於該腔室 24 內的軸向流動之流體中設定均勻的壓力。

在任何情況下，根據本發明，在本實施例中，無論電解液是否循環再使用，其均係容納於電解液室 24 的兩個表面 14 與 20 之內。如上所述，外表面 14 係可旋轉的，而內

表面 20 則保持固定，或者只要旋轉速率 $\Omega_2 \neq \Omega_1$ ，兩個表面 14、20 都是可旋轉的。旋轉圓柱 18 的旋轉在液體進入腔室 24 時，立即在電解液流動 A_E 中賦予充滿能量，但非紊流的 TVF 54 與圓形庫頁特流 56。

在電解液和燃料或氧化劑的電極 12、18 內的觸媒表面的三相化學反應是兼具隨溫度而變和放熱的特性。燃料、電解液或氧化劑最初可藉由平衡系統 (BOP) 或內部加熱器而加熱。透過平衡系統的電解液的再循環通過提供了溫度控制、酸鹼 (pH) 值調整、沉澱物過濾，以及可能為另一電極所需之回收由一電極所產生之水的水。

在一實施例中，燃料電池 (10) 包含在多孔陰極 (12) 與陽極 (18) 電極之間輸送電解液 (A_E) 的裝置 (24, 26, 28)，該等裝置進一步包含以橫向於在電極 (12, 18) 之間輸送之電解液 (A_E) 的方向，輸送電解液之交叉流動 (A_F, A_O) 通過電極 (12, 18) 之一的裝置 (32, 34, 36, 42)。

在一實施例中，燃料電池 (10) 包含在其多孔陰極 (12) 和陽極 (18) 電極之間輸送電解液 (A_E) 的裝置 (24, 26, 28)，該等裝置進一步包含以橫向於在電極 (12, 18) 之間輸送之電解液 (A_E) 的方向，輸送電解液之交叉流動 (A_F, A_O) 通過電極 (12, 18) 之一的裝置 (32, 34, 36, 42)，其中輸送電解液交流動通過電極之一的裝置包含輸送氣溶膠混合物與由燃料與氧化劑所構成之群組之一的交叉流動 (A_F, A_O) 通過電極 (12, 18) 之一的裝置 (32, 34, 36, 42)。

在一實施例中，燃料電池 (10) 包含在其多孔陰極 (12) 和陽極 (18) 電極之間輸送電解液 (A_E) 的裝置 (24, 26, 28)，該等裝置進一步包含以橫向於在電極 (12, 18) 之間輸送之電

解液 (A_E) 的方向，輸送電解液之交叉流動 (A_F, A_O) 通過電極 (12, 18) 中的至少一電極的裝置 (32, 34, 36, 42)，其中輸送電解液之交叉流動通過電極之一的裝置，包含輸送電解液與由燃料與氧化劑交叉流動 (A_F, A_O) 所構成群組之一的氣溶膠混合物通過電極 (12, 18) 中之一電極的裝置 (32, 34, 36, 42)，且/或該等裝置進一步包含：(i) 在流經電極 (12, 18) 中的至少一電極的被輸送之氣溶膠混合物交叉流動中，維持氣體-電解液體積比為至少 4:1 的裝置；及/或(ii) 在氣溶膠混合物進入電極 (12, 18) 中的至少一電極時，使該氣溶膠混合物之體積，以及氣溶膠混合物電解液之莫耳濃度與由燃料和氧化劑所構成群組中的至少一種氣體至少維持化學計量平衡的裝置；及/或(iii) 在氣溶膠混合物進入電極 (12, 18) 中的至少一電極時，使該氣溶膠混合物之體積，以及氣溶膠混合物電解液之莫耳濃度與由燃料和氧化劑所構成群組中的至少一種氣體至少維持化學計量平衡的裝置；及/或(iv) 該化學計量平衡係藉由控制系統而予以維持，該控制系統包含：蒸氣蒸汽壓力、電解液蒸汽壓力、燃料體積和氧化劑質量流量之計量裝置；及/或(v) 多孔電極 (12, 18) 中之至少一者含有觸媒粒子；及/或(vi) 該觸媒粒子係與奈米碳管混合；及/或(vii) 電極 (12, 18) 之一在電解液交叉流動 (A_F, A_O) 的方向的厚度至少為 250 微米；及/或(viii) 電極 (12, 18) 之一在電解液交叉流動 (A_F, A_O) 的方向的厚度不超過 10,000 微米；及/或(ix) 在陰極 (12) 和陽極 (18) 電極之間輸送電解液的裝置，其包含在電極 (12, 18) 的電解液間隙 (24) 中產生 TVF (54) 的裝置 (12, 18, 52)；及/或(x) 包含在電極 (12, 18) 之間的電解液間隙 (24) 中

產生 CCF (56) 的裝置 (12, 18, 52) ; 及/或(xi)包含於電極 (12, 18) 中之至少一電極的觸媒粒子和奈米碳管的混合物, 該電極在電解液交叉流動的方向之厚度至少為 250 微米; 及/或(xii) 透過電極 (12, 18) 中之一電極輸送電解液與一由燃料及氧化劑交叉流動 (A_F , A_O) 所構成群組之一的氣溶膠混合物的裝置 (32, 34, 36, 42), 在電極 (12, 18) 之間的電解液間隙 (24) 中產生 TVF (54) 的裝置 (12, 18, 52), 以及包含於至少電極 (12, 18) 中之一電極的觸媒粒子和奈米碳管的混合物, 該電極在電解液交叉流動的方向之厚度至少為 250 微米; 及/或(xiii) 在電極 (12, 18) 中的至少一電極產生電聲動能的電聲換能器 (58)。

在一實施例中, 產生傳輸電力的方法係透過陽極終端電器 (44) 經由外部電路負載 (46) 至陰極終端電器 (48), 該方法包含下列步驟: (i) 透過電解液輸入管 (26) 輸送電解液進入電解液室 (24) 成為流動 (A_E); (ii) 輸送氧化劑及電解液混合物進入氧化劑輸入管 (32), 並透過噴霧器噴嘴 (34) 於氧化劑歧管 (30) 形成薄霧, 接著交叉流動 (A_O) 經由陰極 (12) 進入電解液室 (24); (iii) 輸送燃料和電解液混合物進入燃料輸入管 36, 並透過噴霧器噴嘴 (42) 於燃料歧管 (38) 形成薄霧, 接著交叉流動 (A_F) 經由陽極 (18) 注入電解液室 (24); (iv) 供應電力予電動馬達驅動裝置 (52), 以使一圓柱 (12, 18) 以一足以在電解液室 (24) 之流動 A_E 內產生 TVF (54) 及 CCF (56) 之速率 $\Omega_2 \neq \Omega_1$, 相對於另一圓柱 (18, 12) 旋轉, 使得陽離子和陰離子在電極表面 (14, 20) 反應以形成水蒸氣, 該水蒸氣與其他反應產物、未反應之燃料和未反應之氧化劑在電解液室 (24) 被 TVF (54) 所捕集; 以及

(v) 從電解液室 (24) 排出含有水與其他反應產物、未反應燃料與未反應氧化劑的電解液。

本發明中的厚電極直接反應燃料電池和觸媒電極所提供的電化學能量轉換系統，遠遠超越了長期以來先前技術的燃料電池電極的 1 安培/平方公分的性能障礙。雖然本發明所揭露者係關於利用泰勒渦旋流 (TVF) 與圓形庫頁特流 (CCF) 的厚電極直接反應燃料電池之實施例的描述和說明，應理解者為，本說明書所揭露之內容並不以所描述之實施例與範例為限。因此，應以參照以下申請專利範圍為主，而確定本發明的範圍。

【圖式簡單說明】

第 1A 圖為本發明中之厚電極直接反應燃料電池的部分剖視圖。該厚電極直接反應燃料電池可從高氫含量燃料，例如 100% 之甲醇中產生電能，而無需藉助稀釋燃料或燃料重組器將氫氣及氧氣轉換成電能和水，並處理含碳廢物來萃取氫氣 (H_2)。

第 1B 圖為顯示第 1A 圖之電池的陰極電極部分之部分放大圖。

第 2 圖為顯示一個燃料電池的陰極之延伸進入由泰勒渦旋流 (TVF) 產生的圓形庫頁特流 (CCF) 的突起部分之透視圖。

【主要元件符號說明】

10	厚電極直接反應燃料電池(TEDRFC)
12	固定之多孔圓柱狀陰極電極
14	內表面
16	金屬框架

18	多孔圓柱狀陽極電極
20	外表面
22	旋轉軸
24	電解液室
26	電解液輸入管
28	電解液排出管
30	氧化劑歧管
32	氧化劑輸入管
34	噴霧器噴嘴
36	燃料輸入管
38	燃料歧管
40	旋轉器
42	噴霧器噴嘴
44	終端電器
46	外部電路負載
54	泰勒渦旋流 (TVF)
56	圓形庫頁特流 (CCF)
58	集電環與集電刷組合作
60	旋轉軸
62	圓柱狀突起
64	粒子和氣泡

發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※ 申請案號：100135560

※ 申請日：

100.9.30

※IPC 分類：

H01M 8/54 (2006.01)
H01M 8/54 (2006.01)

一、發明名稱：(中文/英文)

利用交叉流動及泰勒渦旋流之厚電極直接反應燃料電池
THICK ELECTRODE DIRECT REACTION FUEL CELLS
UTILIZING CROSS-FLOWS AND TAYLOR VORTEX
FLOWS

二、中文發明摘要：

本發明提供直接反應燃料電池 (10)，其係具有透過含有觸媒粒子之混合物的厚多孔電極 (12,18) 之旋轉，而在電解液室 (24) 產生泰勒渦旋流 (54) 和圓形庫頁特流 (56) 的電解液混合物之交叉流動 (cross-flow)。

三、英文發明摘要：

Direct reaction fuel cells (10) with cross-flow of an electrolyte mixture through thick, porous electrodes (12, 18) that contain a mixture of catalyst particles and that rotate to generate Taylor Vortex Flows (54) and Circular Couette Flows (56) in electrolyte chambers (24) are disclosed.

七、申請專利範圍：

1. 一種燃料電池 (10)，其係包含在其多孔陰極 (12) 與陽極 (18) 電極之間輸送電解液 (A_E) 的裝置 (24, 26, 28)，其係進一步包含：
以橫向於在電極 (12, 18) 之間所輸送之電解液 (A_E) 的方向，而輸送電解液之交叉流動 (A_F, A_O) 通過電極 (12, 18) 的至少一個電極的裝置 (32, 34, 36, 42)。
2. 如申請專利範圍第 1 項之燃料電池 (10)，其中該交叉流動輸送之電解液包含：氣溶膠混合物與來自於由燃料和氧化劑所構成的群組中的一種氣體，其係通過電極 (12, 18) 中的至少一個電極而輸送之交叉流動 (A_F, A_O)。
3. 如申請專利範圍第 2 項之燃料電池 (10)，其中輸送電解液交叉流動的裝置 (32, 34, 36, 42) 包含：在流經電極 (12, 18) 中的至少一個電極的被輸送之氣溶膠混合物交叉流動中，維持該氣溶膠混合物之氣體-電解液體積比為至少 4:1 的裝置。
4. 如申請專利範圍第 2 至 3 項之燃料電池 (10)，其中該輸送氣溶膠混合物的裝置包含：在該氣溶膠混合物進入電極 (12, 18) 中的至少一個電極時，使該氣溶膠混合物之體積，以及該氣溶膠混合物電解液之莫耳濃度與由燃料和氧化劑所構成群組中的至少一種氣體至少維持化學計量平衡的裝置。
5. 如申請專利範圍第 4 項之燃料電池 (10)，其中該化學計量平衡係藉由控制系統而予以維持，該控制系統包含：蒸氣蒸汽壓力、電解液蒸汽壓力、燃料體積和氧化劑質量流量之計量裝置。

6. 如申請專利範圍第 1 至 5 項中任一項之燃料電池 (10)，其中多孔電極 (12, 18) 中之至少一個電極含有觸媒粒子。
7. 如申請專利範圍第 6 項之燃料電池 (10)，其中該觸媒粒子係與奈米碳管混合。
8. 如申請專利範圍第 1 至 7 項中任一項之燃料電池 (10)，其中電極 (12, 18) 中之一者在電解液交叉流動 (A_F , A_O) 方向的厚度至少為 250 微米。
9. 如申請專利範圍第 1 至 8 項中任一項之燃料電池 (10)，其中電極 (12, 18) 中之一者在電解液交叉流動 (A_F , A_O) 方向的厚度不超過 10,000 微米。
10. 如申請專利範圍第 1 至 9 項中任一項之燃料電池 (10)，其中在陰極 (12) 與陽極 (18) 電極之間輸送電解液的裝置包括在電極 (12, 18) 之間的電解液間隙 (24) 中產生泰勒渦旋流 (54) 的裝置 (12, 18, 52)。
11. 如申請專利範圍第 1 至 10 項中任一項之燃料電池 (10)，其中在陰極 (12) 與陽極 (18) 電極之間輸送電解液的裝置包括在電極 (12, 18) 之間的電解液間隙 (24) 中產生圓形庫頁特流 (56) 的裝置 (12, 18, 52)。
12. 如申請專利範圍第 1 至 11 項中任一項之燃料電池 (10)，其係進一步包含在電極 (12, 18) 中的至少一個電極產生電聲動能的電聲換能器 (58)。
13. 一種產生傳輸電力之方法，其係透過陽極終端電器 (44) 經由外部電路負載 (46) 而傳送至陰極終端電器 (48)，該方法包含下列步驟：
 - i. 經由電解液輸入管 (26) 輸送電解液進入電解液室 (24) 成為流動 (A_E)；

- ii. 輸送氧化劑及電解液氣溶膠混合物進入該氧化劑輸入管（32），並透過噴霧器噴嘴（34）於該氧化劑歧管（30）形成薄霧，然後交叉流動（ A_O ）經由陰極（12）注入該電解液室（24）；
 - iii. 輸送燃料和電解液氣溶膠混合物進入該燃料輸入管36，並透過噴霧器噴嘴（42）於該燃料歧管（38）形成薄霧，然後交叉流動（ A_F ）經由陽極（18）注入該電解液室（24）；
 - iv. 供應電力予電動馬達驅動裝置（52），以使一圓柱（12, 18）以足以在該電解液室（24）之流動 A_E 內產生泰勒渦旋流（54）及圓形庫頁特流（56）之速率 $\Omega_2 \neq \Omega_1$ 相對於另一圓柱（18, 12）旋轉，使得陽離子和陰離子在電極表面（14, 20）反應以形成水蒸氣，該水蒸氣與其他反應產物、未反應之燃料和未反應之氧化劑在電解液室（24）被泰勒渦旋流（54）所捕集。
 - v. 從該電解液室（24）排出含有水與其他反應產物、未反應燃料與未反應氧化劑的電解液。
14. 如申請專利範圍第 13 項之方法，其係包含在電極（12, 18）中的至少一個電極產生電聲動能。

國
A
探

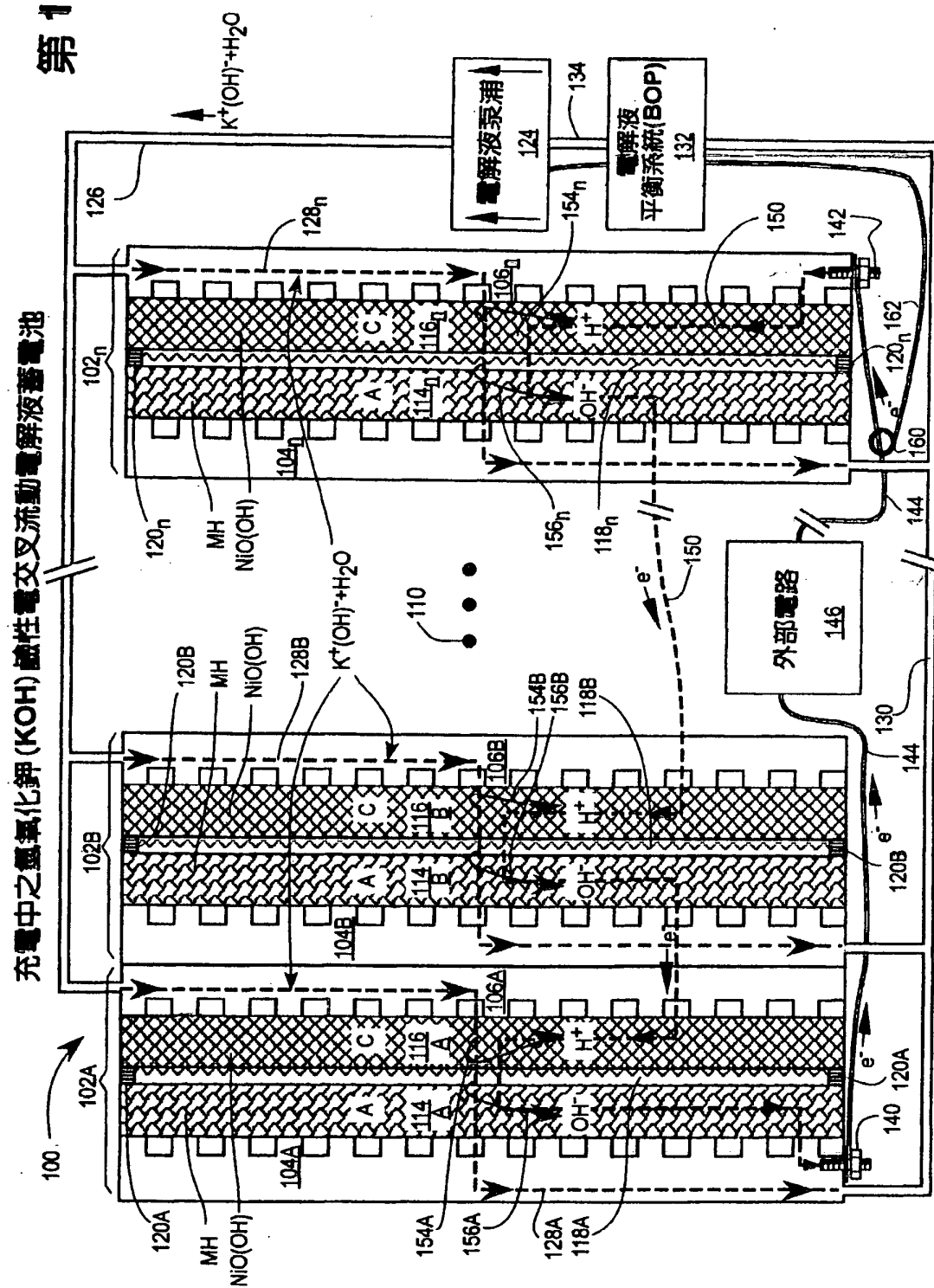
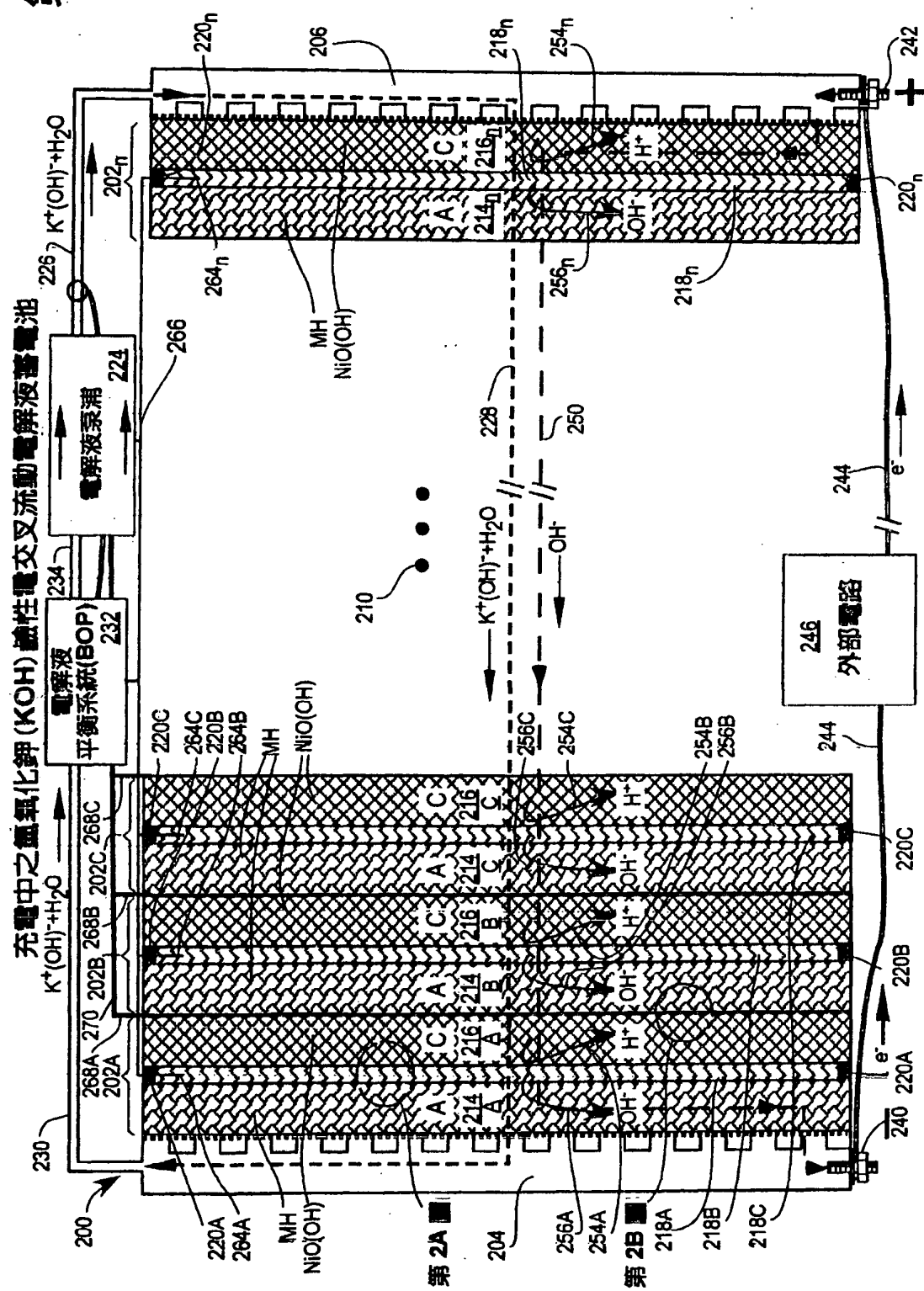
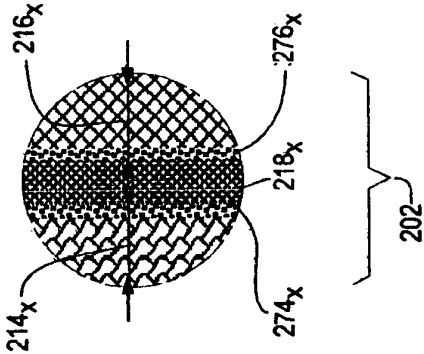


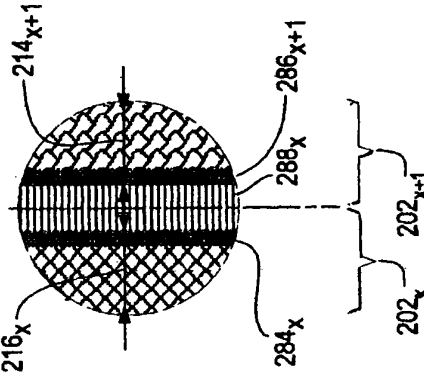
圖 2 無

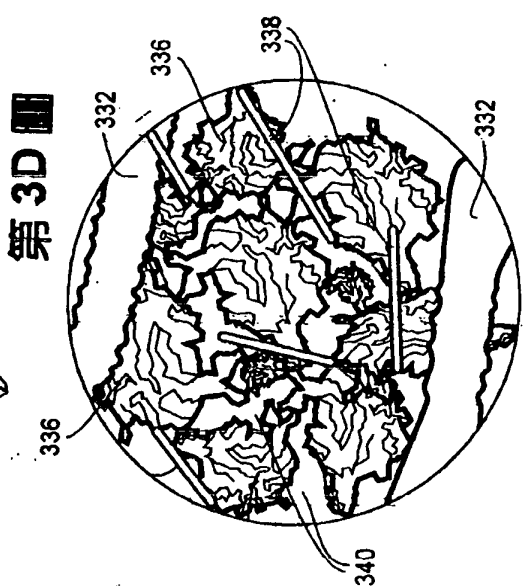
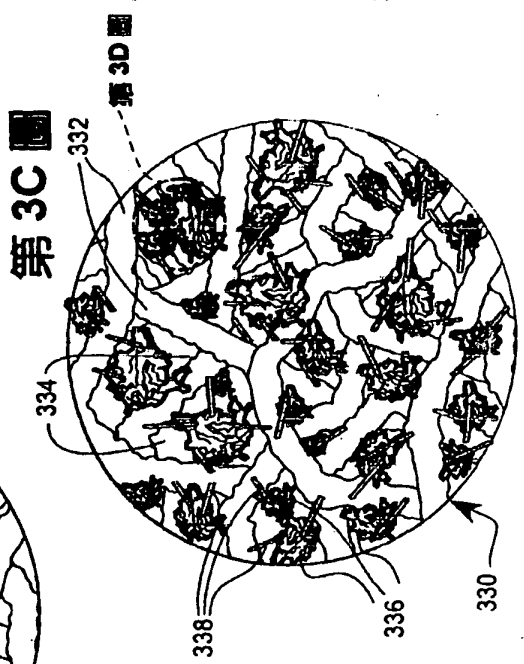
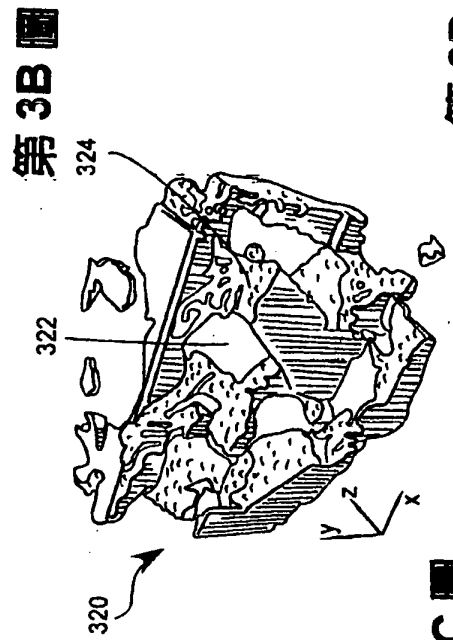
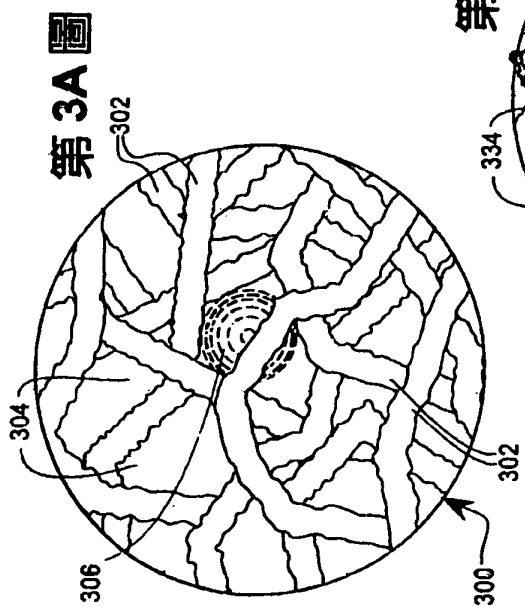


第 2A 圖



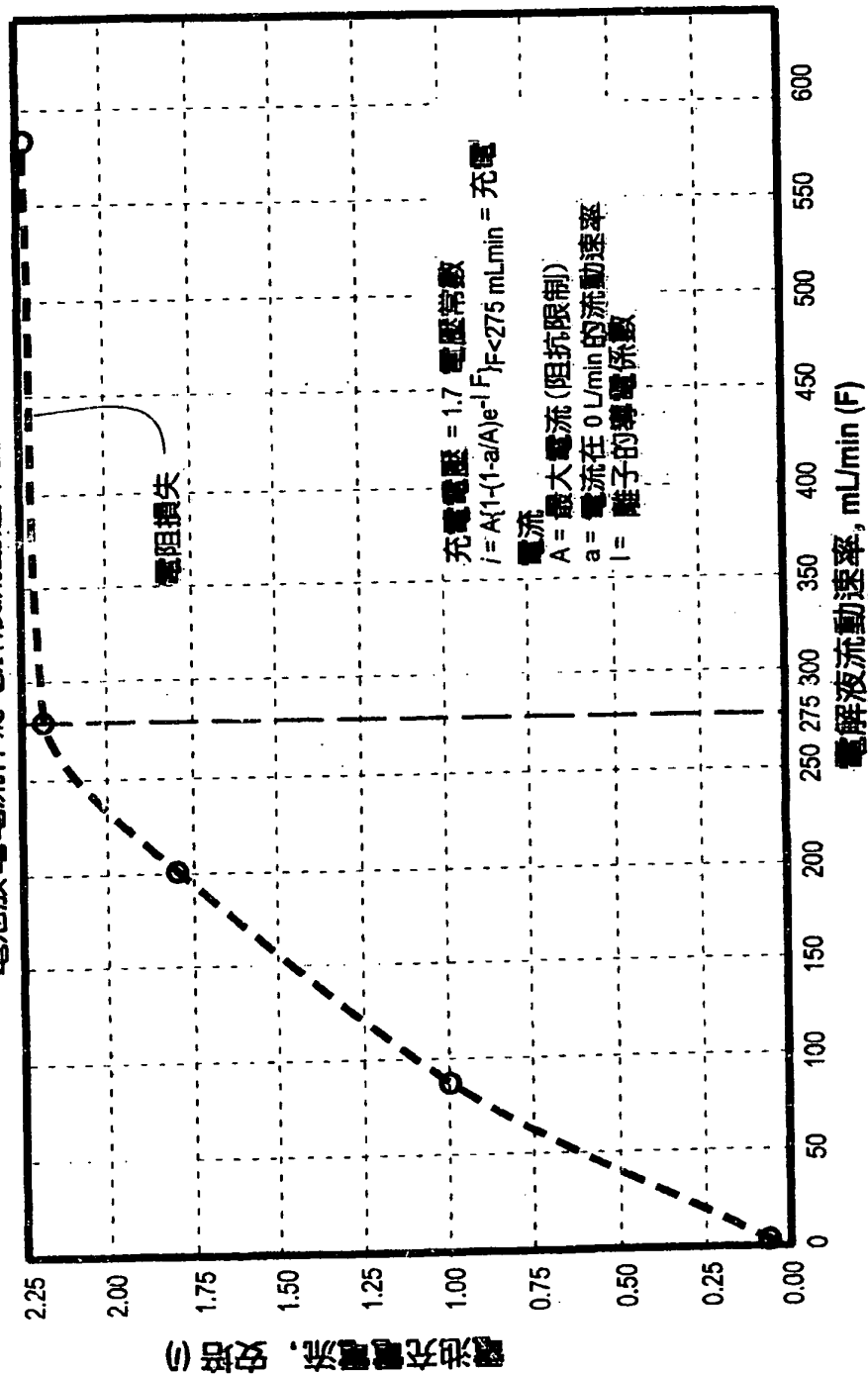
第 2B 圖





第 4 圖

電池放電電流作為電解液流動速率的函數



四、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：無。

圖式中無適合做為代表圖者。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

無。

五、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

無。