



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I856414 B

(45)公告日：中華民國 113 (2024) 年 09 月 21 日

(21)申請案號：111142792

(22)申請日：中華民國 111 (2022) 年 11 月 09 日

(51)Int. Cl. : A61L2/08 (2006.01)

G01T1/00 (2006.01)

G01T7/00 (2006.01)

G01T1/16 (2006.01)

(30)優先權：2021/11/10 美國

63/263,854

(71)申請人：美商西屋電器公司(美國) WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC (US)

美國

美國匹茲堡大學(美國) UNIVERSITY OF PITTSBURGH-OF THE  
COMMONWEALTH SYSTEM OF HIGHER EDUCATION (US)

美國

(72)發明人：赫保 麥可 D HEIBEL, MICHAEL D. (US) ; 洛普雷斯帝 布萊恩 J LOPRESTI,  
BRIAN J. (US) ; 康吉多 湯瑪士 V CONGEDO, THOMAS V. (US)

(74)代理人：陳長文

(56)參考文獻：

CN 111724926A

CN 112366020A

WO 2020/254689A1

審查人員：陳建宏

申請專利範圍項數：25 項 圖式數：6 共 65 頁

(54)名稱

使用伽瑪輻射生成 AC-225

(57)摘要

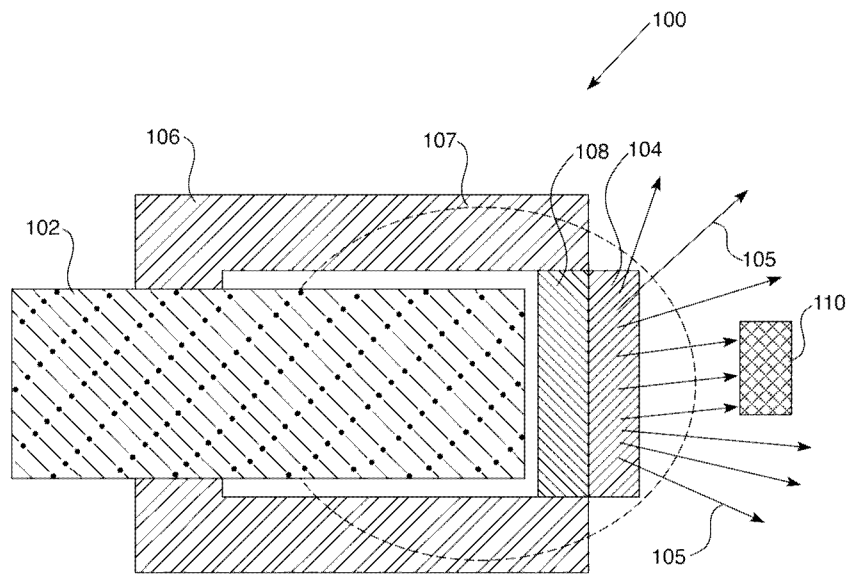
本文中揭示使用伽瑪輻射產生器來自 Ra-226 生成 Ac-225 之裝置、系統及方法。該伽瑪輻射產生器可利用電子中子產生器或核反應器來生成高能瞬發捕獲伽瑪輻射。藉由伽瑪輻射輻照 Ra-226 以生成 Ra-225，其再衰變生成 Ac-225。使用電子中子產生器及諸如 Gd-157 之輻照標靶材料來生成高能伽瑪輻射而不使用連續衰變之放射性同位素(諸如 Co-60)之方法可顯著地降低成本並提高與生成高能伽瑪輻射及 Ac-225 相關之安全性。

Devices, systems, and methods to produce Ac-225 from Ra-226 using gamma-radiation generator are disclosed herein. The gamma radiation generator can utilize an electronic neutron generator or a nuclear reactor to produce high energy prompt-capture gamma-radiation. The Ra-226 is irradiated by the gamma radiation to produce Ra-225, which decays to produce Ac-225. The method of using electronic neutron generator and an irradiation target material such as Gd-157 to produce high energy gamma radiation without using a continuously decaying radioisotope such as Co-60 could significantly reduce the cost and increase the safety associated with the production of high energy gamma radiation and Ac-225.

指定代表圖：

符號簡單說明：

- 100:裝置
- 102:中子產生器
- 104:中子捕獲儲集器
- 105:伽瑪輻射
- 106:屏蔽件
- 107:中子通量場
- 108:中子緩和劑
- 110:標靶



【圖 1】



## 公告本

I856414

## 【發明摘要】

【中文發明名稱】 使用伽瑪輻射生成AC-225

【英文發明名稱】 PRODUCING AC-225 USING GAMMA

RADIATION

## 【中文】

本文中揭示使用伽瑪輻射產生器來自 Ra-226 生成 Ac-225 之裝置、系統及方法。該伽瑪輻射產生器可利用電子中子產生器或核反應器來生成高能瞬發捕獲伽瑪輻射。藉由伽瑪輻射輻照 Ra-226 以生成 Ra-225，其再衰變生成 Ac-225。使用電子中子產生器及諸如 Gd-157 之輻照標靶材料來生成高能伽瑪輻射而不使用連續衰變之放射性同位素(諸如 Co-60)之方法可顯著地降低成本並提高與生成高能伽瑪輻射及 Ac-225 相關之安全性。

## 【英文】

Devices, systems, and methods to produce Ac-225 from Ra-226 using gamma-radiation generator are disclosed herein. The gamma radiation generator can utilize an electronic neutron generator or a nuclear reactor to produce high energy prompt-capture gamma-radiation. The Ra-226 is irradiated by the gamma radiation to produce Ra-225, which decays to produce Ac-225. The method of using electronic neutron generator and an irradiation target material such as Gd-157 to produce high energy gamma radiation without using a continuously decaying radioisotope such as Co-60 could significantly reduce the cost and increase the safety associated with the production

of high energy gamma radiation and Ac-225.

【指定代表圖】 圖 1

【代表圖之符號簡單說明】

100:裝置

102:中子產生器

104:中子捕獲儲集器

105:伽瑪輻射

106:屏蔽件

107:中子通量場

108:中子緩和劑

110:標靶

## 【發明說明書】

【中文發明名稱】 使用伽瑪輻射生成AC-225

【英文發明名稱】 PRODUCING AC-225 USING GAMMA  
RADIATION

### 【技術領域】

【0001】 本揭示大致上係關於生成Ac-225之方法、系統、及裝置，且更特定言之，係關於使用由電子中子產生器或核反應器產生之高能瞬發捕獲伽瑪輻射來自鐳-226(Ra-226)生成銻-225(Ac-225)的方法、系統及裝置。

### 【先前技術】

### 【發明內容】

【0002】 提供以下發明內容來幫助瞭解本文所揭示之態樣之一些獨特創新特徵，且不意圖作為完整描述。從全份說明書、申請專利範圍、及發明摘要的整體可獲得對各種態樣的全面性理解。

【0003】 在一態樣中，揭示一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之裝置。該裝置包括電子中子產生器、輻照標靶插入物、及 Ra-226 插入物。該電子中子產生器從電子中子產生器的發射端產生熱中子通量。該輻照標靶插入物包括回應於暴露至由電子中子產生器所產生之熱中子通量而產生伽瑪輻射的輻照標靶材料。該輻照標靶插入物係定位在接近於電子中子產生器的發射端。該 Ra-226 插入物包括回應於暴露至由輻照標靶材料產生之伽瑪輻射而生成 Ra-225 的 Ra-226 標靶材料。

**【0004】** 在一態樣中，揭示一種自 Ra-226 生成 Ac-225 之方法。該方法包括使用電子中子產生器來產生中子通量。該方法進一步包括藉由將輻照標靶材料暴露於中子通量來生成伽瑪輻射。該方法進一步包括藉由用伽瑪輻射輻照包含 Ra-226 標靶材料的 Ra-226 插入物來生成 Ra-225。

**【0005】** 在一態樣中，揭示一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之系統。該系統包括核反應器及輻照標靶總成。該核反應器包括反應器核心。該輻照標靶總成係可插入至反應器核心內。該輻照標靶總成包括 Ra-226 標靶插入及提取裝置、輻照標靶圍堵結構、及管徑通規外鞘(outer rabbit sheath)。該 Ra-226 標靶插入及提取裝置包括含有 Ra-226 的 Ra-226 材料及封閉且密封該 Ra-226 材料的 Ra-226 固持器。該輻照標靶圍堵結構包括輻照標靶材料及封閉並密封該輻照標靶材料的輻照標靶固持器。該輻照標靶圍堵結構至少部分地圍繞該 Ra-226 標靶插入及提取裝置。該管徑通規外鞘包括封閉端且至少部分地圍繞該輻照標靶圍堵結構。

**【0006】** 在一態樣中，揭示一種自 Ra-226 生成 Ac-225 之方法。該方法包括將輻照標靶總成插入至核反應器的核心內。該輻照標靶總成包括 Ra-226 材料及輻照標靶材料。該方法進一步包括在核反應器的核心內產生中子通量。該方法進一步包括藉由使輻照標靶材料暴露於中子通量來生成伽瑪輻射。該方法進一步包括藉由用伽瑪輻射輻照 Ra-226 材料來生成 Ra-225。

**【0007】** 通過考慮以下為全部形成本說明書之一部分的實施方式和所附申請專利範圍且參考附圖，將變得更明白本揭示的此等及其他目的、特性和特徵以及結構相關元件的操作方法和功能及部件組合和製造經濟性，其中相同參考數字指示各圖中的對應部件。可根據本揭示組合所

有態樣及具體例。然而，應明確瞭解，圖式僅為了說明和描述的目的，且無意圖界定本揭示的限制。

### 【圖式簡單說明】

【0008】 本文中所描述之態樣的各種特徵在所附申請專利範圍中細緻闡述。然而，可如下根據結合隨附圖式進行之以下實施方式來理解關於操作之組織及方法連同其優點之各種態樣：

【0009】 圖 1 繪示根據本揭示之一態樣之電子中子產生器驅動之伽瑪輻射產生器之橫截面示意圖。

【0010】 圖 2 繪示根據本揭示之一態樣之可移動式核心內偵測系統之示意圖。

【0011】 圖 3 繪示根據本揭示之一態樣之同位素生成纜線總成驅動纜線總成之示意圖。

【0012】 圖 4 繪示根據本揭示之一態樣之標靶固持器元件及快速分離之母部的平面圖，該母部連接標靶固持器元件纜線總成至圖 3 中顯示的驅動纜線總成。

【0013】 圖 5A 繪示根據本揭示之一態樣之用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之系統之橫截面圖之示意圖。

【0014】 圖 5B 繪示根據本揭示之一態樣，用於圖 5A 之系統中之具有 Ra-226 輻照標靶之 Ra-226 輻照裝置之細部橫截面圖之示意圖。

【0015】 圖 5C 繪示根據本揭示之一態樣，用於圖 5A 之系統中之可移除 Ra-226 插入物之細部橫截面圖之示意圖。

【0016】 圖 5D 繪示根據本揭示之一態樣，沿圖 5C 之 Ra-226 輻照插入物之線 A-A 之截面圖之示意圖。

【0017】 圖 6A 繪示根據本揭示之一態樣，可插入至核反應器之反應器核心內的輻照標靶總成之橫截面圖的示意圖。

【0018】 圖 6B 繪示根據本揭示之一態樣，沿圖 6A 所示之輻照標靶總成之線 B-B 之截面圖的示意圖。

【0019】 本文中所陳述之範例以一種形式說明本揭示之各種態樣，且此類範例不應被解釋為以任何方式限制本揭示之範疇。

### 【實施方式】

【0020】 本申請案根據 35 U.S.C. § 119(e) 主張 2021 年 11 月 10 日提出申請標題為「使用伽瑪輻射產生器產生高能瞬發捕獲伽瑪輻射來生成 AC-225 (PRODUCING AC-225 USING A GAMMA-RADIATION GENERATOR TO PRODUCE HIGH ENERGY PROMPT-CAPTURE GAMMA RADIATION)」之美國臨時申請案第 63/263,854 號的權益及優先權，其揭示內容以全文引用之方式併入本文中。

【0021】 在詳細解釋關節式操控器之各種態樣之前，應注意，說明性實例在應用或使用上不受限於隨附圖式及描述中所揭示之細節。應瞭解，說明性實例可以其他態樣、變化及修改來實施或併入，且可以各種方式來實踐或進行。另外，除非另有指示，否則出於為了方便讀者而描述說明性實例之目的而非出於其限制之目的來選擇本文中所使用之術語及表述。

【0022】 銻-225 ( $^{225}\text{Ac}$ , Ac-225) 係銻的同位素。其以約十天之半衰期經歷  $\alpha$  衰變至釷-221，且係錒系列(始於  $^{237}\text{Np}$  的衰變鏈)中之中間衰變產物。除了於自然界中自此衰變鏈產生的微小量外，Ac-225 完全係合成的。

【0023】 放射性同位素 Ac-225 的衰變性質有利地用於，且愈來愈常被用於提供標靶阿爾法療法(TAT；Targeted Alpha Therapy)。臨床試驗已證實含有 Ac-225 的放射性藥物可用於治療各種類型的癌症。然而，由其需要在迴旋加速器中合成所導致之此同位素的稀少性限制其之潛在應用。Ac-225 的可用供應低於需求。

【0024】 本揭示提供可用於自鐳-226(Ra-226)之伽瑪輻照生成 Ac-225 的方法、裝置及系統。明確而言，可使用 Ra-226 來生成鐳-225(Ra-225)，其隨後再直接衰變至 Ac-225。大供應量之 Ra-226 可含於來自天然氣生產過程(例如，Marcellus Shale 天然氣生產)的回流水中，如以下期刊文章所述：「在自非常規氣體提取產生水之處理過程中，鐳與硫酸鋇及硫酸鍶之共沉澱及其對鐳命運的影響(Co-precipitation of Radium with Barium and Strontium Sulfate and Its Impact on the Fate of Radium during Treatment of Produced Water from Unconventional Gas Extraction)」，Environmental Science and Technology Journal, Tieyuan Zhang, Kelvin Gregory, Richard W. Hammack, Radisav D. Vidic, 2014 年 3 月 26 日(「Zhang-1」)；「藉由感應耦合電漿質譜法分析來自非常規氣體提取之高鹽度廢水中的鐳-226(Analysis of Radium-226 in High Salinity Wastewater from Unconventional Gas Extraction by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)」，Environmental Science and Technology Journal, Tieyuan Zhang, Daniel Bain, Richard Hammack, 及 Radisav D. Vidic, 2015 年 2 月 2 日(「Zhang-2」)；及「Marcellus Shale 回流水貯水體中之鐳命運及相關健康風險評估(Fate of Radium in Marcellus Shale Flowback Water Impoundments and Assessment of Associated Health Risks)」，Environmental Science

and Technology Journal, Tiejuan Zhang, Richard W. Hammack, 及 Radisav D. Vidic, 2015 年 7 月 8 日(「Zhang-3」), 各者以全文引用的方式併入本文。

【0025】 例如, Zhang-2 及 Zhang-3 報告, 自 Marcellus Shale 之天然氣提取產生大量回流水, 其含有高含量的鹽度、重金屬、及天然存在的放射性物質(NORM)。此水在再利用、處理或處置之前通常儲存在集中式儲存貯水體或槽中。Ra-226 係回流水中的主要 NORM 組分。在兩年半的期間內研究賓州(Pennsylvania)西南部三個集中式儲存貯水體中的 Ra-226 命運。現場採樣顯示, 在再利用回流水於水力壓裂期間, 此等儲存設施中的 Ra-226 濃度一般而言逐漸增加。此外, Ra-226 富集於底部固體(例如, 貯水體污泥)中, 其中其自新鮮污泥的低於 10 pCi/g 增加至陳年污泥的數百 pCi/g。貯水體污泥之連續提取程序(SEP)與化學組成分析的組合顯示, 重晶石係污泥中 Ra-226 的主要載體。

【0026】 Zhang-2 亦報告一種組合感應耦合質譜法(ICP-MS)與固相提取法(SPE)的改良方法, 其用來自於研究中之高鹽度溶液中之基質元素分離及純化鐳同位素。此方法減少分析時間, 同時仍維持必要的精確度及偵測極限。鐳分離係使用以下之組合來完成: 強酸陽離子交換樹脂, 其將鋇及鐳自溶液中之其他離子分離; 及鋇特異性樹脂, 其將鐳與鋇分離並獲得適合藉由 ICPMS 進行分析的樣本。方法最佳化針對具有高達 171,000 mg/L 之總溶解固體的合成 Marcellus Shale 廢水(MSW)樣本達成高鐳回收率(對於標準模式  $101\pm6\%$  及對於碰撞模式  $97\pm7\%$ )。使用 ICP-MS 測得具有總溶解固體(TDS)之實際 MSW 樣本中的 Ra-226 濃度高達 415,000 mg/L, 其與伽瑪光譜法的結果相當一致。因此, 可自 Marcellus Shale 天然氣生產過程產生的回流水提供大供應量之 Ra-226。

【0027】 Diamond 等人，「利用電子加速器之銻-225 生成 (Actinium-225 Production with an Electron Accelerator)」, W.T. Diamond 及 C.K. Ross，於 2021 年 1 月 1 日提交給 *Journal of Applied Physics* 的原稿，DOI: 10.1063/5.0043509(其全文以引用的方式併入本文)報告存在使用阿爾法發射同位素來治療若干癌症之標靶阿爾法療法 (TAT)之逐漸增長的臨床價值證據，及缺乏關鍵阿爾法發射同位素(尤其 Ac-225)之可取得性。大多數 Ac-225 的供應係來自三個 Th-229 產生器，該等產生器每個月生成數百 mCi 之 Ac-225。Diamond 等人報告使用電子加速器來生成 Ac-225 的數種不同途徑。例如，Ac-225 可利用具有至少 16 MeV 之質子能量的醫療同位素迴旋加速器，利用反應 Ra-226(p,2n)Ac-225 來生成。生成 Ac-225 的另一方法係使用高能質子(150 至 800 MeV)來散裂鈷靶。Ac-225 亦可藉由光核反應，Ra-226( $\gamma$ ,n)Ra-225 來生成。Ra-225 通過貝他(beta)衰變衰變至具有 14.9 天之半衰期的 Ac-225。光子係由具有約 25 至 30 MeV 之能量的強烈電子束來生成。Diamond 等人進一步報告在 20 kW 之射束功率下，將能夠自分成二至四個獨立囊封靶之 1 公克鐳之 10 天輻照生成四居禮之 Ra-225 之產量之鐳靶及標靶腔室的技術描述。此等標靶可經濟出得到接近四居禮的 Ac-225。Diamond 等人亦描述一種將 Ac-227 之生成降低至低於 Ac-225 之產量之百萬份之幾之值的方法。

【0028】 本揭示提供自 Ra-226(例如，源自來自 Marcellus Shale 天然氣生產過程或其他類似過程的回流水，諸如在鈾礦開採過程中生成的廢水之 Ra-226)生成 Ac-225 之供應的方法、裝置、及系統。該等方法、裝置、及系統可使用電子中子產生器或核反應器來產生經引導至輻照標靶(例如，Gd-157 材料)的熱中子。暴露於熱中子後，輻照標靶可生成瞬

發捕獲伽瑪輻射。使用瞬發捕獲伽瑪輻射來輻照 Ra-226 以生成 Ra-225，其再衰變生成 Ac-225。

**【0029】** 以下，本揭示首先提供各種使用電子中子產生器來產生伽瑪輻射的裝置、系統及方法。此等裝置、系統、及方法可用於利用伽瑪輻射輻照 Ra-226 以生成 Ra-225。接下來，本揭示提供用於將輻照標靶插入至反應器核心內及自其中取出的裝置、系統、及方法。可利用此等裝置、系統、及方法來向反應器核心內插入及取出經組構以利用伽瑪輻射輻照 Ra-226 生成 Ra-225 的輻照標靶總成。本揭示隨後轉而提供(i)使用電子中子產生器來生成 Ac-225 之裝置、系統、及方法，以及(ii)使用核反應器來生成 Ac-225 之裝置、系統及方法。此外，本揭示提供關於 Ra-225 及 Ac-225 藉由熱中子輻照 Gd-157 之實例生成速率的細節。

### 使用電子中子產生器生成伽瑪輻射

**【0030】** 圖 1 繪示根據本揭示之若干非限制性態樣的經組構以使用中子產生器 102 來產生伽瑪輻射 105 之裝置 100 的橫截面圖。

**【0031】** 裝置 100 包括經組構以產生熱中子之中子產生器 102。在一些態樣中，中子產生器 102 可係市售的管狀電子中子產生器。由中子產生器 102 產生之熱中子產生中子通量場 107。

**【0032】** 裝置 100 進一步包括中子捕獲儲集器 104(例如，輻照標靶)，其包括經組構以與入射中子反應來產生伽瑪輻射之中子捕獲材料。中子捕獲儲集器 104 可經定位成接近於經組構以產生中子通量場 107 之中子產生器 102 之末端(例如，中子產生器 102 之熔合反應源末端、中子產生器 102 之發射端)。因此，由中子產生器 102 所產生之熱中子(例如，中子通量場 107)可被引導朝向中子捕獲儲集器 104。回應於來自中子產

生器 102 之入射熱中子，中子捕獲儲集器 104 可發射伽瑪輻射 105(例如，瞬發中子捕獲伽瑪輻射)。此外，裝置 100 可經組構使得經發射的伽瑪輻射 105 被引導朝向標靶 110(例如，Ra-226 材料)。結果，標靶 110 經伽瑪輻射 105 輻照。經伽瑪輻射 105 輻照，可導致包含 Ra-226 材料之標靶 110 生成 Ra-225，其再衰變至 Ac-225。

**【0033】** 在一些態樣中，自中子捕獲儲集器 104 發射之伽瑪輻射 105 為高能伽瑪輻射。如本文中所使用，「高能伽瑪輻射」可指具有不小於 1.2 MeV 之能量的伽瑪輻射，諸如不小於 2 MeV、不小於 3 MeV、不小於 4 MeV、不小於 5 MeV、不小於 6 MeV、不小於 7 MeV，或約 7 MeV。

**【0034】** 在一些態樣中，中子捕獲儲集器 104 及/或包括於中子捕獲儲集器 104 中之中子捕獲材料可為可複製的。在一個態樣中，中子捕獲材料可包括釷材料。釷材料可富含釷-157(在本文中有時被稱為 Gd-157)。在另一態樣中，中子捕獲材料可包括鈾材料。鈾材料可富含鈾-174(在本文中有時被稱為 Hf-174)。在又一態樣中，中子捕獲材料可具有高熱中子橫截面。如文中所使用，「高熱中子橫截面」可意指大於鈾-174 的熱中子橫截面。在又其他態樣中，輻照標靶材料可具有約 257,000 邦 (barn) 及/或大於約 257,000 邦之熱中子橫截面。

**【0035】** 中子捕獲儲集器 104 可經組構以在曝露於由中子產生器 102 產生之中子通量場 107 時產生伽瑪輻射 105。此外，中子捕獲儲集器 104 可經組構以在中子通量場 107 被移除時停止產生伽瑪輻射 105。換言之，裝置 100 可經組構以使得當中子產生器 102 被去啟動時，沒有殘餘伽瑪輻射 105 及/或中子通量 107 自裝置 100 被發射。舉例而言，釷材料可包括富含 Gd-157 之  $Gd_2O_3$ 。 $Gd_2O_3$  可經富集至具有至少約 50 wt.%、

至少約 60 wt.%、至少約 70 wt.%、至少約 80 wt.%、至少約 85 wt.%、至少約 87 wt.%、至少約 90 wt.%、約 87 wt.%至 100 wt.%或約 87 wt.%之 Gd-157。

【0036】 隨著 Gd-157 捕獲自中子產生器 102 發射之熱中子，會形成 Gd-157m 同位素。在形成後，Gd-157m 同位素就立即發射可具有約 7 MeV 之總能量的一或多個伽瑪光子。一或多個經發射的伽瑪光子可輻照該輻照標靶 110。此外，因為 Gd-157m 同位素立即發射一或多個伽瑪光子，所以沒有殘餘伽瑪輻射 105 會在中子產生器 102 被去啟動之後由裝置發射。

【0037】 仍參照圖 1，在一些態樣中，裝置 100 可包括經結構以控制及/或最佳化中子捕獲儲集器 104 處之中子通量 107 之位準的中子緩和劑 108。中子緩和劑 108 可定位於中子產生器 102 與中子捕獲儲集器 104 之間。中子緩和劑 108 包括中子緩和劑材料及中子緩和劑厚度。在一些態樣中，中子緩和劑材料包括石墨、水、重水(D<sub>2</sub>O)或其組合。在一些態樣中，中子緩和劑厚度可為可調整的。在另外其他態樣中，中子緩和劑 108 相對於中子產生器 102 及/或中子捕獲儲集器 104 之位置、中子緩和劑材料及/或中子緩和劑厚度 108 可經最佳化以控制中子捕獲儲集器 104 處之熱中子通量 107 之位準。此最佳化可使用各種軟體工具，諸如蒙地卡羅 N- 粒子輸運程式 (Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP))來進行。在一些態樣中，裝置 100 可包括檢修門及/或開口以允許置放中子緩和劑 108 及/或裝置 100 之其他組件。

【0038】 仍參照圖 1，裝置 100 可包括圍繞裝置 100 之至少一部分及/或其組件的屏蔽件 106。舉例而言，屏蔽件 106 可經結構以圍繞中子產生器 102 之細長部分之末端並延伸經過細長部分之末端，從而圍繞中

子緩和劑 108，如圖 1 中所展示。在一些態樣中，屏蔽件 106 可繼續延伸經過中子產生器 102 之細長部分之末端並至少部分地涵蓋中子捕獲儲集器 104。舉例而言，屏蔽件 106 可經組構成圍繞中子緩和劑 104 之側面並具有緊鄰於標靶 110 之開口。屏蔽件 106 包括屏蔽材料。在一些態樣中，屏蔽材料可包括鉛或適於最小化及/或防止伽瑪輻射 105 在非想要的方向上逸出裝置 100 之另一類似屏蔽材料。舉例而言，屏蔽件 106 可經組構以最小化在遠離標靶 110 之方向上自中子捕獲儲集器 104 逸出裝置 100 之伽瑪輻射 105 的量。在一些態樣中，屏蔽材料可包括鉛或適於幫助將中子通量場 107 圍阻於裝置 100 內之另一類似屏蔽材料。舉例而言，屏蔽件 106 可經組構以最小化在遠離中子捕獲儲集器 104 之方向上自中子產生器 102 逸出裝置 100 之熱中子(中子通量場 107)的量。在一些態樣中，屏蔽件 106 可為可調整的。此外，屏蔽件 106 可經組構以裝配於中子產生器 102 之外表面之一部分周圍，以最小化中子 107 及/或伽瑪輻射 105 之暴露至可能圍繞裝置的設備。屏蔽件 106、中子緩和劑 108 及/或中子捕獲儲集器 104 可經組構以與傳統管狀電子中子產生器設計一起使用。

**【0039】** 仍參照圖 1，輻照標靶 110 處之伽瑪輻射 105 場之強度可基於諸如中子捕獲儲集器 104 處之中子通量場 107 之特性、中子捕獲材料之特性(例如，中子捕獲儲集器 104 中之 Gd-157 之量)及中子捕獲儲集器 104 距標靶 110 之距離的操作參數來控制。此外，遞送至標靶 110 之伽瑪輻射 105 之當量劑量可基於以上參數(例如，基於伽瑪輻射 105 場之強度及 Gd-157m 衰變方案)來確定。遞送至輻照標靶 110 之伽瑪輻射 105 之當量劑量的此確定可使用諸如 MCNP 之市售套裝軟體來執行。因此，裝置 100 可經組構以將所要劑量之伽瑪輻射 105 遞送至標靶 110。

【0040】 在一些態樣中，多個裝置 100 可一起用以產生具有等於由個別裝置 100 產生之伽瑪輻射場強度之總和之強度的伽瑪輻射場。此外，多個裝置 100 可以各種配置組態以產生與個別裝置相比更大及/或具有更均一強度之伽瑪輻射場。在一些態樣中，多個中子產生器 102 可一起用以產生多個(例如，重疊)中子通量場 107，其用以自共同中子捕獲儲集器 104 產生瞬發中子捕獲伽瑪輻射。

【0041】 關於伽瑪輻射產生系統、裝置及方法的其他細節可見於美國臨時申請案第 63/166,718 號及國際申請案第 PCT/US22/71260 號，其各以引用的方式併入本文。根據本揭示的各種態樣，可使用所揭示之系統、裝置及方法中之任一者來自 Ra-226 生成 Ra-225。

### 向反應器核心內插入及取出輻照標靶

【0042】 美國專利第 10,755,829 號('829 專利)(其全文以引用的方式併入本文)揭示輻照標靶處理裝置及用於將標靶移動至核反應器中之方法。'829 專利揭示一種裝置，其使材料能夠根據需要經輻照，以在核反應器的核心內生成期望的轉變產品。該裝置提供一種用於監測接近經輻照材料之中子通量的手段，以允許確定所生成之轉變產物的量。該裝置使經輻照材料能夠插入至反應器中且保持在期望的軸向位置，且當需要時可在不關閉反應器的情況下自反應器取出。該裝置之大部分可再利用於後續的輻照。該裝置亦能夠簡單且快速地將未經輻照之標靶材料附接至裝置之傳送原動力之部分，以將標靶材料插入至反應器中及從反應器中取出標靶材料，及使經輻照之材料自裝置快速分離以用於處理。用於將標靶材料移入至核反應器中及從核反應器中取出標靶材料之方法適用於本揭示，用來將含有 Ra-226 之標靶材料移動至核反應器中及將含有 Ra-

226 之標靶材料自核反應器取出(例如，諸如針對圖 6A-6B 論述於下文之含有 Ra-226 標靶材料的輻照標靶總成 500)。圖 2-4 及以下的隨附描述提供將標靶材料移入至核反應器中及從核反應器取出標靶材料之各種態樣的相關細節。

**【0043】** 圖 2 繪示用於將可移動式偵測器 12 插入至反應器核心 14 中之典型系統。偵測器 12 經驅入至其中之可伸縮套管 10 採取如圖 2 所示之途徑。套管 10 係經由導管插入至反應器核心 14 中，該等導管自反應器容器 16 之底部延伸穿過混凝土屏蔽區域 18，且接著延伸直至套管密封台 20。於密封台 20 處設置可伸縮套管與導管之間的機械密封。導管 22 基本上為反應器容器 16 之延伸部，其中套管 10 允許插入核心內儀器可移動式偵測器 12。在操作期間，套管 10 為固定的，且將僅在更換燃料或維護操作期間在減壓條件下縮回。若需要在容器內部工作，則亦可能將套管撤回至反應器容器之底部。

**【0044】** 用於插入偵測器 12 之驅動系統可包括驅動單元 24、限制開關總成 26、5 路徑旋轉轉移裝置 28、10 路徑旋轉轉移裝置 30 及隔離閥 32。各驅動單元利用附接至纜線之前端的偵測器 12 及小直徑同軸纜線將中空螺旋纏繞驅動纜線推入至核心內，該小直徑同軸纜線將經由中空中心螺接之偵測器輸出傳達回至驅動纜線之後端。

**【0045】** 套管 10 可用於產生輻照所需之中子活化及轉變產物，諸如用於醫療程序之同位素，或利用諸如 Gd-157 之材料產生瞬發中子捕獲伽瑪輻射。以下圖 3-4 中描述的同位素生成纜線提供一種將待經輻照的材料插入至位於反應器核心 14 中之通量套管內及自其中取出的手段。

**【0046】** 現參照圖 3-4，同位素生成纜線總成包括驅動器纜線總成 36 及標靶固持器元件 38。驅動纜線總成 36 包括一纜線，其經建構為與

用於在商業核反應器核心 14 中插入和取出感測器 12 的現有纜線驅動系統(諸如示意性顯示於圖 2 中之可移動式核心內偵測器系統及/或可移動的核心內探針(TIP ; traversing in-core probe)系統)的驅動機制要求相容。驅動纜線總成 36 內部包含自供電偵測器元件 44 的信號引線 42。自供電偵測器 44 的作用部分為圍繞驅動纜線 40 之插入端外部的螺旋纏繞，其長度足以提供穩健的信號輸出及從端到端的最小軸向位置差。使用自供電偵測器 44 的輸出來在反應器核心 14 中的自供電偵測器位置處識別反應器通量，以允許最佳化標靶材料的軸向位置。

**【0047】** 驅動纜線總成 36(其係其中一個偵測器 12 所耦接之現有驅動纜線的替代)使用於圖 3 至 4 中藉由元件符號 48 及 50 所識別之球卡環配置(亦稱為球鏈耦接)附接至標靶固持器元件纜線總成 38。該球及卡環配置具有連接至驅動纜線總成 36 之反應器插入端的球或公部分 48。卡環部分 50 係藉由連接器插腳 52 附接至標靶固持器元件纜線總成 38 上的標靶材料固持器 43。快速分離耦接之球部分 48 係經設計成配合於卡環部分 50 內且由其可分離地捕獲。標靶固持器元件纜線總成 38 包含標靶材料固持器 43，其係極薄金屬網狀物 47 的中空圓柱體，具有足以將期望量的標靶材料固持於作用反應器核心 14 之限制中的長度。在將標靶材料自反應器取出之後，標靶固持器元件纜線總成 38 可容易且快速地與驅動纜線總成 36 分離。在標靶固持器元件纜線總成 38 之插入端上所指示的蓋 45 藉由環夾 46 固定於定位。環夾 46 係經設計成容易移除。一旦將其移除，經輻照材料即可自標靶固持器元件纜線總成之內部移除。

**【0048】** 於上文及於‘829 專利中論述之用於將標靶材料移入至核反應器中及自核反應器取出標靶材料的裝置、系統、及方法適用於本揭示，用來將輻照標靶總成(例如，輻照標靶總成 500)及/或含有 Ra-226 之

標靶材料移入至核反應器中及自核反應器取出含有 Ra-226 之標靶材料。

### 使用中子產生器生成 Ac-225

【0049】圖 5A-5D 繪示根據本揭示的各種態樣，使用雙電子中子產生器 402 之系統 400 的示意圖，其可用於自含有 Ra-226 的輻照標靶生成 Ra-225。雖然系統 400 包括兩個電子中子產生器 402，但系統 400 可經修改以僅包括一個電子中子產生器 402 或包括多於兩個電子中子產生器 402。如圖 5A 所示，系統 400 包括雙電子中子產生器 402 及 Ra-226 輻照裝置 430。雙電子中子產生器 402 係配置在 Ra-226 輻照裝置 430 的相對側，使得雙電子中子產生器 402 所產生的中子可輻照包含於 Ra-226 輻照裝置 430 之一個或多於一個輻照標靶插入物 420 內之標靶材料(例如，Gd-157 材料)，以產生伽瑪輻射(例如，伽瑪射線)。

【0050】在一些態樣中，包含於一個或多於一個輻照標靶插入物 420 內之標靶材料(例如，Gd-157 標靶材料)可包括富含 Gd-157 之  $Gd_2O_3$ 。舉例而言， $Gd_2O_3$  可經富集至具有至少約 50 wt.%、至少約 60 wt.%、至少約 70 wt.%、至少約 80 wt.%、至少約 85 wt.%、至少約 87 wt.%、至少約 90 wt.%、約 87 wt.% 至 100 wt.% 或約 87 wt.% 之 Gd-157。

【0051】圖 5B 繪示 Ra-226 輻照裝置 430 之示意圖的詳細視圖。如圖 5A 及 5B 所示，Ra-226 輻照裝置 430 包括兩個 Ra-226 插入物 414 及三個輻照標靶插入物 420。在其他態樣中，可在 Ra-226 輻照裝置 430 中使用任何數目的 Ra-226 插入物 414 及輻照標靶插入物 420。Ra-226 插入物可各自包括 Ra-226 固持器 410、置放於 Ra-226 固持器 410 中的 Ra-226 碟 408、及操作棒 412。輻照標靶插入物 420 可各自包括 Gd-157

碟 406。輻照裝置 430 可進一步包括一個或多於一個中子緩和劑 404，其包含中子緩和材料，諸如石墨、水及/或  $D_2O$ 。如圖 5A 之非限制性態樣中顯示，Ra-226 輻照裝置 430 係經組構成具有按以下順序放置的組件：中子緩和劑 404、輻照標靶插入物 420、Ra-226 插入物 414、輻照標靶插入物 420、Ra-226 插入物 414、輻照標靶插入物 420、及中子緩和劑 404。中子緩和劑 404 可包括固持器，以固持及/或密封在中子緩和材料內。將 Ra-226 碟 408 置放於接近經密封之 Gd-157 碟 406 的 Ra-226 固持器 410 中可允許 Ra-226 材料經自 Gd-157 碟 406 之 Gd-157 材料產生的高能伽瑪輻射輻照，藉此由 Ra-226 材料生成 Ra-225。將一層 Gd-157 或 Gd-157 碟 406 置放於 Ra-226 碟 408 之間允許由 Ra-226 中之高能伽瑪反應所產生的光中子生成額外的伽瑪輻射，從而提高高能伽瑪輻射產生。此可繼而提高 Ra-225 的生成。

**【0052】** Ra-226 輻照裝置 430 可經組構成以藉由容許在 Ra-226 標靶材料及/或輻照標靶材料(例如，Gd-157)之輻照期間產生之氣體(例如，氦氣)膨脹，不引起自經密封之 Ra-226 碟 408 及/或 Ga-157 碟 420 之排氣，而使 Ra-225 之生成量最大化。Ra-226 輻照裝置 430、Ra-226 碟 408 及 Gd-157 碟之厚度及其他尺寸可經最佳化，以例如，基於由 Gd-157 材料之熱中子輻射生成之伽瑪輻射的平均能量最大化 Ra-225 之生成。一旦在 Ra-226 碟 408 中生成預定量的 Ra-225，即可將碟 408 自 Ra-226 輻照裝置 430 移除且更換為新鮮的 Ra-226 碟 408。繪示於圖 5A 及 5B 中之 Ra-226 輻照裝置 430 組態可替代地或額外地允許當 Gd-157 耗乏位準已達到預定臨限值時，用新鮮的碟替換 Gd-157 碟 406。可測量設備周圍的伽瑪輻射位準且用來確定 Ra-226 生成位準及/或 Gd-157 耗乏位準。

**【0053】** Ra-226 碟 408 及/或 Gd-157 碟 406 可呈圓柱體、立方體、

長方體、六角棱柱體、橢圓形的形狀或任何其他形狀。在一態樣中，Ra-226 碟 408 及 Gd-157 碟 406 可均呈圓柱形狀。在另一態樣中，Ra-226 碟 408 及 Gd-157 碟 406 可均呈長方體形狀。Ra-226 輻照裝置 430、Ra-226 碟 408 及/或 Gd-157 碟中之各者的形狀及尺寸(諸如直徑、厚度、高度、長度、寬度及其他尺寸)可經最佳化，以最大化，例如，基於藉由 Gd-157 材料之熱中子輻射所產生之伽瑪輻射之平均能量生成 Ra-225。

【0054】如圖 5B 所示，Ra-226 輻照裝置 430 可進一步包括介於 Ra-226 插入物 414 與輻照標靶插入物 420 之間的四個中子緩和劑 404。因此，在一些態樣中，Ra-226 輻照裝置 430 可包括兩個 Ra-226 插入物 414，其各自包括 Ra-226 固持器 410、置放於各個 Ra-226 固持器 410 中的 Ra-226 碟 408、在各個 Ra-226 碟 408 末端處的氣體膨脹間隙 418 及操作棒 412。Ra-226 輻照裝置 430 可進一步包括三個輻照標靶插入物 420，其各自包括 Gd-157 碟 406 及在各個輻照標靶插入物 420 之末端處的氣體膨脹間隙 416。Ra-226 輻照裝置 430 可進一步包括四個中子緩和劑 404，其中中子緩和劑 404 中之一者位於 Ra-226 插入物 414 與輻照標靶插入物 420 之間的各個界面處，如圖 5B 所示。Ra-226 插入物 414 及輻照標靶插入物 420 中之各者可與彼此及與 Ra-226 輻照裝置 430 分離，以允許將插入物 414、420 插入至 Ra-226 輻照裝置 430 中及自其中取出。中子緩和劑 404 可包括中子緩和材料，諸如石墨、水及/或重水 ( $D_2O$ )。

【0055】圖 5C 繪示圖 5A 及 5B 之 Ra-226 插入物 414 的詳細截面圖。圖 5D 繪示沿圖 5C 之 Ra-226 輻照插入物 414 之線 A-A 之截面圖的示意圖，其中 Ra-226 插入物 414 的形狀為圓柱形。如圖 5C 及 5D 所示，Ra-226 插入物 414 包括 Ra-226 固持器 410、置放於 Ra-226 固持器 410

中之 Ra-226 碟 408、操作棒 412 及位於 Ra-226 碟 408 之末端處及/或圍繞 Ra-226 碟 408 的氣體膨脹間隙 418。此在 Ra-226 插入物 414 中具有氣體膨脹間隙 418 之設計可使可自 Gd-157 伽瑪源生成之 Ra-225 之量最大化，且允許 Ra-226 碟及在 Ra-226 之輻照期間生成之氣體(諸如氦(He)、氬或其他氣體)膨脹，而不引起自經密封之 Ra-226 插入物 414 的排氣。

### 使用核反應器生成 Ac-225

**【0056】** 在各種態樣中，本揭示提供使用核反應器(諸如壓水式反應器(PWR)或沸水反應器(BWR))來生成 Ac-225 之裝置、系統及方法。圖 6A 及 6B 提供含有 Ra-226 之輻照標靶總成 500 的示意圖，該輻照標靶總成可使用在許多壓水式反應器(PWR)設計中常見之可移動式核心內偵測器系統(MIDS；Movable In-core Detector System)(例如，針對圖 2 論述於前之 MIDS 系統)來插入至核反應器中之反應器核心中及自其中取出。另外或替代地，輻照標靶總成 500 輻照標靶總成可使用於許多沸水反應器(BWR)設計中常見的可移動的核心內探針系統(TIPS)來插入至核反應器中之反應器核心中及自其中取出。

**【0057】** 圖 6A 繪示根據本揭示之至少一態樣之實例輻照標靶總成 500 的橫截面側視圖。圖 6B 繪示根據本揭示之至少一態樣，沿圖 6A 之輻照標靶總成 500 之剖面線 B-B 的截面圖。輻照標靶總成 500 包括 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540；輻照標靶圍堵結構 550(例如，Gd-157 標靶圍堵結構)，其包括輻照標靶材料 506(例如，Gd-157 標靶材料)及輻照標靶物固持器 522(例如，Gd-157 標靶固持器)；及具有彈鼻部(bullet nose)的管徑通規外鞘 530。管徑通規外鞘 530 封閉除一端外的 Ra-226

標靶插入及提取裝置 540 及輻照標靶圍堵結構 550，如圖 6A 所示。

【0058】 於一些態樣中，輻照標靶材料 506(例如，Gd-157 標靶材料)可包括富含 Gd-157 之  $Gd_2O_3$ 。舉例而言， $Gd_2O_3$  可經富集至具有至少約 50 wt.%、至少約 60 wt.%、至少約 70 wt.%、至少約 80 wt.%、至少約 85 wt.%、至少約 87 wt.%、至少約 90 wt.%、約 87 wt.% 至 100 wt.% 或約 87 wt.% 之 Gd-157。

【0059】 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 配合於輻照標靶圍堵結構 550 的中空圓柱體內部。Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 可與輻照標靶圍堵結構 550 及管徑通規外鞘 530 分離，且可自由移動並可插入至輻照標靶圍堵結構 550 中及自其中取出。Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 可包括 Ra-226 標靶材料 508，其包括 Ra-226；Ra-226 固持器 534，其封閉 Ra-226 標靶材料 508；及操作把手 524，其連接至 Ra-226 固持器 534。操作把手 524 可有助於將 Ra-226 標靶材料 508 插入至輻照標靶圍堵結構 550 中及/或自輻照標靶圍堵結構 550 提取 Ra-226 標靶材料 508。

【0060】 Ra-226 固持器 534 包括第一壁 528、中心棒 526、第二壁 532、及第三壁 536，且封閉 Ra-226 標靶材料 508。中心棒係沿著 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 的中心軸。Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 可進一步包括位在 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 之一端處的氣體膨脹間隙 518。在一態樣中，Ra-226 標靶材料 508 可呈單個或多個固體件的形式，或呈壓實於 Ra-226 固持器 534 內部的粉末形式。在另一態樣中，Gd-157 材料 506 可呈單個或多個固體件的形式，或呈壓實於輻照標靶固持器 522 內部的粉末形式。

【0061】 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 中的氣體膨脹間隙 518 可具有至少  $1.0\text{ cm}^3$  的氣體膨脹體積。此於 Ra-226 標靶插入及提取裝置

540 中具有氣體膨脹間隙 518 之裝置設計可使可自輻照標靶(例如，Gd-157)伽瑪源生成之 Ra-225 之量最大化，且可允許 Ra-226 材料及在 Ra-226 之輻照期間生成之氣體(諸如氦(He)、氬或其他氣體)膨脹，而不引起自經密封之 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 的排氣。

【0062】 在一態樣中，輻照標靶總成 500 的形狀為圓柱形。在另一態樣中，Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 的形狀為圓柱形。在另一態樣中，輻照標靶圍堵結構 550 的形狀為圓柱形且與 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 同心。在又另一態樣中，管徑通規外鞘 530 係呈圓柱形，其具有封閉 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 及輻照標靶圍堵件 550(除一端外)的封閉彈鼻端部，如圖 6A 所示。管徑通規外鞘 530 與 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 及輻照標靶圍堵結構 550 同心。在一態樣中，管徑通規外鞘 530 係由金屬或金屬合金(諸如 SS-315 不銹鋼、316 不銹鋼、合金-690(Alloy-690)或鋳合金(Zircalloy))製成。Ra-226 固持器 534、操作把手 524 及輻照標靶固持器 522 各自可由金屬或金屬合金 SS-315 不銹鋼、合金-690 或鋳合金製成。

【0063】 在各種態樣中，輻照標靶總成 500 在輻照標靶總成 500 內部使用一層 Gd-157 材料(亦即，輻照標靶材料 506)，且其圍繞 Ra-226 標靶材料 508 來以具有足夠能量的伽瑪輻射輻照 Ra-226 以生成 Ra-225。若無此 Gd-157 圍繞 Ra-226 標靶材料的組態，則分裂光譜伽瑪能量可能過低而無法起始 Ra-226 中的光中子反應。可將圖 6A 及 6B 顯示的輻照標靶總成 500 示意圖置於(例如，MIDS、TIPS 之)管徑通規固持器中。輻照標靶圍堵結構 550 可與 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 以及管徑通規鞘 530 或「表皮」分離。此允許將 Ra-226 標靶插入及提取裝置 540 從輻照標靶總成 500(即，管徑通規 500)中取出並安裝新的 Ra-226 標靶插

入及提取裝置 540。當耗乏位準達到預定臨限值時，可額外或替代地更換輻照標靶圍堵結構 550。輻照標靶總成 500、標靶插入及提取裝置 540、及輻照標靶圍堵結構 550 的長度、直徑及其他尺寸可基於待於 Ra-226 標靶材料 508 之可用橫截面區域內經輻照之 Ra-226 標靶材料 508 的質量來確定。輻照標靶總成 500 可呈圓柱體、立方體、長方體之形狀或其他形狀。在一態樣中，輻照標靶總成 500 係呈圓柱形，且管徑通規 500 之外徑係由可移動式核心內偵測系統(MIDS)及/或可移動的核心內探針系統(TIPS)所使用之分裂腔室的最大外徑來確定。可調整 Ra-226 標靶材料 508 的長度以達成期望的標靶質量含量來最大化 Ac-225 生成。

**【0064】** 輻照標靶總成 500 可移動進出核反應器之反應器核心以產生伽瑪輻射並進一步自 Ra-226 生成 Ra-225(衰變至 Ac-225)。可測量輻照標靶總成 500 周圍的伽瑪輻射位準且用以確定 Ra-225 生成及 Gd-157 耗乏位準。如上文所提及，Heibel 等人於‘829 專利(例如，上文針對圖 2-4 所描述之部分)中揭示用於將標靶移入至核反應器中之輻照標靶處理裝置，且亦提供用於監測接近經輻照材料之中子通量以容許確定所生成之轉變產物量的裝置及系統。‘829 專利之用於將標靶材料移動進出核反應器之反應器核心的方法及裝置可類似地應用於用來將 Ra-226 標靶材料 508 移動進出核反應器之反應器核心的輻照標靶總成 500。用於監測接近經輻照材料之中子通量以容許確定所生成之轉變產物量的裝置及系統亦可類似地應用於輻照標靶總成 500 用來監測及/或確定 Ra-225 生成及 Gd-157 耗乏位準。

**【0065】** 本文中所論述之使用電子中子產生器及/或核反應器來生成 Ac-225 之各種裝置、系統及方法能夠生成大量 Ac-225。使用電子中子產生器來生成 Ac-225 的裝置、系統及方法可允許更快速地後處理輻照

標靶總成，以最小化 Ac-225 的衰變損耗。在一些態樣中，使用電子中子產生器的各種方法不需要核反應器擁有者參與生成，且可能極大地受益於可自電子中子產生器獲得之最大可達成中子通量的進步。涉及使用核反應器的各種方法可允許生成相對較高的 Ac-225 活性密度。

**【0066】** 本文所論述之用於生成 Ac-225 的裝置、系統、及方法提供生成使用於標靶阿爾法療法(TAT)中之非常高度期望之阿爾法發射體(Ac-225)的解決方案。Ac-225 目前的市場價格可能超過每毫居禮(mCi)活性 8000 美元。本揭示的裝置、系統及方法每年能夠產生數千 mCi。支援此生產所需的 Ra-226 供應可從壓裂操作獲得。例如，Ra-226 可從 Marcellus Shale 天然氣生產過程期間產生的回流水或從鈾礦開採期間產生的廢水中回收及再利用。

### 藉由熱中子輻照 Gd-157 生成 Ra-225 及 Ac-225 之實例生成速率

**【0067】** 已知  $Gd_2O_3(\Sigma_a^{Gd_2O_3})$  的巨觀中子橫截面為  $5945.5 \text{ cm}^{-1}$ ，假設釷(Gd)為 100% 釷-157(Gd-157)，氧化釷(III)( $Gd_2O_3$ )之理論強度的 100%。每  $\text{cm}^3 Gd_2O_3$  中 Gd-157 之中子反應速率(R)由以下表示式給出：

$$R = \Sigma_a^{Gd_2O_3} \phi$$

**【0068】** 來自電子中子產生器的熱中子通量強度( $\phi$ )等於  $1E8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ，且標靶係直徑 4 英吋及厚度(T)至少 1 英吋的圓柱體。標靶材料內的 R 值係標靶內之中子強度的函數。典型假設為，在材料內 $\phi$ 的值基本上係恆定的。Gd-157 的極大熱中子吸收橫截面要求考慮中子強度成恆定輻照標靶面積(A)及厚度(T)的函數來確定標靶中的中子反應速率 R。方程式 1 可表示為：

$$R(x) = \Sigma_a^{Gd_2O_3} \phi(x)$$

【0069】  $\phi(x)$  之值可表示為：

$$\phi(x) = \phi(0)e^{-x\Sigma_a^{Gd_2O_3}}$$

【0070】 因此，在標靶中距離  $x$  處的  $R$  值為：

$$R(x) = \Sigma_a^{Gd_2O_3} \phi(0)e^{-x\Sigma_a^{Gd_2O_3}}$$

【0071】 標靶體積內的總反應速率則為：

$$R = A\Sigma_a^{Gd_2O_3} \phi(0) \int_0^T e^{-x\Sigma_a^{Gd_2O_3}} dx$$

【0072】 由於  $\Sigma_a^{Gd_2O_3}$  之大的值，對於任何可觀的  $T$  值，積分皆快速達到  $1/\Sigma_a^{Gd_2O_3}$  的值，因此  $R$  值變為  $A\phi(0)$ 。

【0073】 就電子中子產生器所供應之熱中子通量為  $1 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup>/s，且標靶之圓柱面積為 81.8 cm<sup>2</sup> 的情況而言，標靶內的  $R$  值為  $8.1 \times 10^9$  個反應/s。由於此對應於總伽瑪發射速率，因此可達到 0.219 Ci 之標靶碟中的總伽瑪活性。此對應於 0.003 Ci/cm<sup>2</sup> 標靶。在距標靶碟表面 0.1 cm 點處的對應總活性大約為 0.19 Ci。使用 Rad Pro 將 7 MeV 伽瑪活性轉換成以侖琴(Roentgen)/小時(R/hr)表示的暴露速率，達到  $1.27 \times 10^7$  R/hr 之暴露速率。假設對於經輻照的流體，使用 1 R/hr 等於 0.01 戈雷(Gray)/hr (Gy/hr) 之劑量速率的轉換，則此值對應於在距標靶碟 0.1 cm 處 127 kGy/hr 的劑量速率。然而，由於流體係在假定壁厚為 5 mm 之鋼管內，因此由與管壁內側接觸之水所看見的劑量係約 4.5 kGy/hr。

【0074】 為將鋼管中的流體滅菌，假設確保滅菌所需的總劑量為 4 kGy。因此，流體將需經暴露超過 1.13 小時才能完全滅菌。伽瑪輻射的實際應用將需要在小直徑管中使用低流速的擾流，以確保流體可利用最少數目的輻照裝置在相對短的管段中消毒。

【0075】 應注意，伽瑪輻射亦會導致自管壁向流體中發射  $\delta$  輻射。

標靶的總伽瑪活性為 0.219 Ci。此對應於在標靶區域上方之管之 OD 處  $3.22E7$  R/hr 的總劑量速率。基於鐵自供電偵測器元件對 Co-60 伽瑪輻射的測量靈敏度，管壁對 7 MeV 伽瑪輻射的靈敏度將大約為  $9E-16$  安培/(R/hr)/mm<sup>2</sup>。假設每個裝置的有效表面積為  $81.1$  cm<sup>2</sup> ( $8110$  mm<sup>2</sup>)，則此將產生價值  $0.00024$  安培的電子。由於此對應於大約  $1.5E15$  e<sup>-</sup>/cm<sup>2</sup>/s，因此其對應於在輻照標靶區域上方之管壁內表面處約  $2E5$  kGy 之劑量速率。因此，由  $\delta$  輻射供應至流體之劑量可能顯著地超過在管壁處由伽瑪輻射所供應之劑量。應注意， $\beta$  劑量速率在管中進入流體中 2 cm 前基本上降至零，因此將需要利用具有顯著擾流的小薄壁管來善加利用由伽瑪輻射所提供的  $\delta$  輻射劑量。

**【0076】** 由伽瑪輻射所產生的  $\delta$  輻射亦將由鋼管中的制動輻射 (Bremsstrahlung) 相互作用引起產生大的 X 射線組分。此亦將對管中流體所接受的輻射劑量提供顯著貢獻。至流體的劑量速率與平均 X 射線能量成正比，平均 X 射線能量又與平均  $\delta$  輻射能量成正比。平均  $\delta$  輻射能量與平均伽瑪輻射能量成正比。由於來自 Gd-157m 的峰值伽瑪輻射為約 7 MeV，因此可使用 7 MeV 作為平均  $\delta$  輻射能量。為確定流體中的 X 射線劑量速率，需要每公分壁厚度的有效 X 射線產生橫截面來計算於管壁中產生之 X 射線輻射的強度。

**【0077】** 所有輻射劑量產生機制之總和可允許實際使用裝置設計來處理商業及都市廢水。

**【0078】** 本章節提供一種計算方法，用於確定藉由熱中子輻照 Gd-157 而生成 Ra-225 及 Ac-225 的速率。本章節亦提供自美國臨時申請案第 63/166,718 號中所述裝置計算 Ra-226 中之預期反應速率，以及針對應用電子中子產生器及若使用 '829 專利中所描述之方法兩者之 Ra-225

及 Ac-225 之淨生成成輻照時間的函數。計算結果指示使用本揭示中所描述的任何方法可生成數千 mCi 之 Ac-225。

**【0079】** 以下提供本揭示的其他態樣。

**【0080】** 在各種態樣中，本文揭示一種使用伽瑪輻射產生器來生成 Ac-225 之裝置、系統及方法。在一態樣中，該伽瑪輻射產生器利用電子中子產生器來產生高能瞬發捕獲伽瑪輻射。在另一態樣中，伽瑪輻射產生器利用商業核反應器，諸如壓水式反應器(PWR)及沸水反應器(BWR)。

**【0081】** 在一態樣中，本文揭示一種使用伽瑪輻射產生器利用電子中子產生器產生高能瞬發捕獲伽瑪輻射來生成 Ac-225 之裝置、系統及方法。該系統包括：下文揭示用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之裝置；及至少一個監測器，其用來測量裝置周圍的伽瑪輻射位準，以由此監測衰變形成 Ac-225 之 Ra-225 之生成。

**【0082】** 在一態樣中，本文揭示一種使用伽瑪輻射產生器利用電子中子產生器產生高能瞬發捕獲伽瑪輻射來生成 Ac-225 之裝置。在一態樣中，該裝置包含：至少一個電子中子產生器，其經組構以產生中子或熱中子通量；Ra-226 輻照裝置；及兩個末端中子緩和劑。

**【0083】** 該裝置經組構以引導中子來輻照 Ra-226 輻照裝置。在一態樣中，Ra-226 輻照裝置包含具有 Ra-226 的 Ra-226 標靶材料及伽瑪輻射產生材料。在一態樣中，該伽瑪產生材料為 Gd-157 或 Hf-174，較佳為 Gd-157。

**【0084】** 在一態樣中，該 Ra-226 輻照裝置包含：至少一個 Ra-226 插入物，其包括 Ra-226 固持器及封閉且隔絕密封於該 Ra-226 固持器內的 Ra-226 碟；及至少一個 Gd-157 插入物，其包括 Gd-157 固持器及封

閉且密封(較佳隔絕密封)於該 Gd-157 固持器中的 Gd-157 碟。該 Ra-226 碟包含具有至少約 30 wt.%、至少約 40 wt.%、至少約 50 wt.%、至少約 60 wt.%、至少約 70 wt.%、至少約 80 wt.%、至少約 90 wt.%、至少約 95 wt.%或約 50-100 wt.%之 Ra-226 的 Ra-226 標靶材料。該 Gd-157 碟包含 Gd-157 標靶材料。該 Gd-157 標靶材料包含經富集至具有至少約 50 wt.%、至少約 60 wt.%、至少約 70 wt.%、至少約 80 wt.%、至少約 85 wt.%、至少約 87 wt.%、至少約 90 wt.%之 Gd-157、約 87 wt.%至 100 wt%、或約 87 wt.%的氧化釷( $Gd_2O_3$ )。Gd-157 標靶材料具有經控制之預定質量及幾何性質，以向經輻照之 Ra-226 插入物提供最佳化的伽瑪劑量速率及強度。在一態樣中，該裝置經組構以引導由電子中子產生器所產生之中子來輻照密封於 Gd-157 插入物中之 Gd-157 標靶材料而生成高能伽瑪輻射或伽瑪射線。

**【0085】** 在一態樣中，兩個末端中子緩和劑各自包括具有預定質量及幾何性質的中子緩和材料，以最佳化密封於 Gd-157 插入物中之 Gd-157 碟中的熱中子通量暴露。

**【0086】** 在一態樣中，該 Ra-226 輻照裝置進一步包含至少一個內部中子緩和劑。該內部中子緩和劑包含中子緩和材料，諸如水、重水( $D_2O$ )或石墨。該中子緩和材料具有預定質量及幾何性質，以最佳化密封於 Gd-157 插入物中之 Gd-157 碟中的熱中子通量暴露。

**【0087】** 在一態樣中，該至少一個電子中子產生器係雙、三或更多個電子中子產生器。該至少一個 Ra-226 插入物係兩個、三個或更多個 Ra-226 插入物。該至少一個 Gd-157 插入物在一態樣中係兩個、三個、四個或更多個 Gd-157 插入物。該至少一個中子緩和劑係二、三、四、五、六或更多個中子緩和劑。

【0088】 在一態樣中，該 Ra-226 輻照裝置包括：雙電子中子產生器；Ra-226 輻照裝置。該 Ra-226 輻照裝置包括：兩個 Ra-226 插入物，其各包括 Ra-226 碟及 Ra-226 固持器；及三個 Gd-157 插入物，其各包括 Gd-157 碟及 Gd-157 固持器；及四個內部中子緩和劑，其中該 Ra-226 輻照裝置係經組構成使得所有該等組件自左至右依下列順序彼此相鄰或緊鄰排列：第一右側 Gd-157 插入物，第一內部中子緩和劑，第一 Ra-226，第二內部中子緩和劑，第二 Gd-157 插入物，第三內部中子緩和劑，第二 Ra-226 插入物，第四內部中子緩和劑，及第三 Gd-157 插入物。此 Ra-226 輻照裝置之組態確保各個 Ra-226 插入物夾在兩個 Gd-157 插入物之間，以允許由 Ra-226 插入物中之高能伽瑪反應所產生之光中子生成額外的伽瑪輻射，從而提高高能伽瑪輻射的生成且繼而提高衰變至 Ac-225 之 Ra-225 的生成。

【0089】 在一態樣中，該裝置係經組構成使得所有該等組件(包括雙電子中子產生器、兩個末端中子緩和劑及 Ra-226 輻照裝置)自左至右依下列順序放置：第一電子中子產生器，第一末端中子緩和劑，Ra-226 輻照裝置；及第二中子緩和劑，及第二電子中子產生器。

【0090】 在一態樣中，該裝置進一步包含輻射屏蔽材料，其經組構成鄰近於且圍繞不鄰近於 Ra-226 輻照裝置之電子中子產生器之側面定位，以最小化自不緊鄰於鄰近 Ra-226 輻照裝置之末端中子緩和劑之表面發射的中子及伽瑪輻射。在一態樣中，輻射屏蔽材料為鉛(Pb)。

【0091】 在一態樣中，Ra-226 插入物及 Gd-157 插入物之各者係可與 Ra-226 輻照裝置之其他組件分離，且可自由地移動並能夠插入至 Ra-226 輻照裝置中或自其中取出。

【0092】 在一態樣中，該 Ra-226 插入物進一步包括操作棒，以有

利於將 Ra-226 插入物插入至 Ra-226 輻照裝置中，或自 Ra-226 輻照裝置取出 Ra-226 插入物。

**【0093】** 在一態樣中，Ra-226 插入物之各者具有一或多個氣體膨脹間隙。該一或多個氣體膨脹間隙係位在 Ra-226 碟的頂端或底端或兩端，或圍繞密封在 Ra-226 插入物中之 Ra-226 碟。此裝置設計係要最大化可自 Gd-157 伽瑪源生成之 Ra-225 的量，並允許 Ra-226 碟及於 Ra-226 輻照期間生成的氣體(諸如氦)膨脹，而不會導致自經密封的 Ra-226 碟排氣。Ra-226 插入物中的一或多個氣體膨脹間隙具有至少 1.0 cm<sup>3</sup> 的氣體膨脹體積。此在 Ra-226 插入物中具有氣體膨脹間隙的裝置設計係要最大化可從 Gd-157 伽瑪源生成之 Ra-225 的量，且允許 Ra-226 碟及在 Ra-226 之輻照期間生成之氣體(諸如氦(He)、氬或其他氣體)膨脹，而不會導致自經密封的 Ra-226 插入物排氣。

**【0094】** 在一態樣中，Gd-157 插入物之各者可具有一或多個膨脹間隙。該一或多個氣體膨脹間隙係位在 Gd-157 碟的頂端或底端或兩端，或圍繞密封在 Gd-157 插入物中的 Gd-157 碟。此在 Gd-157 插入物中具有膨脹間隙的裝置設計係要最大化可從 Gd-157 伽瑪源生成之 Ra-225 的量，並允許 Gd-157 碟及在 Gd-157 之輻照期間生成的任何可能氣體膨脹，而不會導致從經密封的 Gd-157 插入物排氣。

**【0095】** 在一態樣中，該裝置進一步包含監測器，以測量該裝置周圍的伽瑪輻射位準，從而監測 Ra-225 生成及 Gd-157 耗乏位準。該裝置係經組構成使得當 Ra-226 插入物中 Ra-225 的生成已升高於預定位準時，可用新鮮的 Ra-226 插入物替換該 Ra-226 插入物。該裝置係經組構成使得當 Gd-157 耗乏位準已升高於預定位準時，可用新鮮的 Gd-157 插入物替換該 Gd-157 插入物。

【0096】 在一態樣中，該裝置不包括電子中子產生器。中子產生器係另外提供。在一態樣中，該裝置不包括用於測量裝置周圍之伽瑪輻射位準的監測器。監測器係另外提供。

【0097】 在一態樣中，該裝置可進一步包含中子屏蔽材料。輻射屏蔽材料係經組構成於鄰近於且圍繞未鄰近於 Ra-226 輻照裝置之電子中子產生器之側面定位，以最小化從未緊鄰於輻照標靶材料之表面發射的輻射。在一態樣中，輻射屏蔽材料為鉛(Pb)。

【0098】 在一態樣中，本文揭示一種使用電子中子產生器來生成高能伽瑪輻射之設備、方法。在一態樣中，使用高能伽瑪輻射輻照 Ra-226 標靶材料以從 Ra-226 生成 Ac-225。

【0099】 在一態樣中，該設備至少包括：用來產生熱中子通量的電子中子產生器；及包括輻照標靶材料的總成。該包括輻照標靶材料的總成係經組構成鄰近於電子中子產生器之一端，諸如電子中子產生器的融合反應源端定位。中子通量經引導至輻照標靶材料並與該輻照標靶材料相互作用，以在該輻照標靶材料中生成中子瞬發捕獲高能伽瑪輻射。在一態樣中，輻照標靶材料為 Gd-157 標靶材料。該總成包括至少一個 Gd-157 插入物，其包括密封在 Gd-157 插入物中的 Gd-157 標靶材料。在一態樣中，該總成係上文所論述之 Ra-226 輻照裝置，且該輻照標靶材料係經組構成包括在該 Ra-226 輻照裝置中。

【0100】 在一態樣中，該用於生成高能伽瑪輻射之設備可包括：經組構以產生熱中子通量的電子中子產生器；包括輻照標靶材料之總成；及用於屏蔽中子及/或伽瑪輻射之輻射屏蔽材料。在一態樣中，該包括輻照標靶材料之總成係經組構成鄰近且緊接於電子中子產生器之融合反應源端定位。該設備係經組構成引導中子通量至包括輻照標靶材料的總成，使

得輻照標靶材料捕獲至少部分的中子通量且與其相互作用，從而生成中子瞬發捕獲高能伽瑪輻射。中子及伽瑪輻射屏蔽材料係經組構成鄰近於且圍繞未鄰近於包括輻照標靶材料之總成之電子中子產生器的側面定位，以最小化從不緊鄰於輻照標靶材料之表面發射的輻射。在一態樣中，輻射屏蔽材料可包括鉛(Pb)。在一態樣中，輻照標靶材料為 Gd-157 標靶材料。該總成包括至少一個 Gd-157 插入物，其包括密封在該 Gd-157 插入物中的 Gd-157 標靶材料。在一態樣中，該總成係上文所論述之 Ra-226 輻照裝置，且該輻照標靶材料係經組構成包括在該 Ra-226 輻照裝置中。

**【0101】** 在一態樣中，該設備係經組構成將高能伽瑪輻射引導至一物體。在一態樣中，該物體包含 Ra-226 標靶材料。在一態樣中，該物體包含 Ra-226 插入物，其具有密封在該 Ra-226 插入物中的 Ra-226 標靶材料。在一態樣中，該物體係上文所論述之總成的一部分且該總成係上文所論述之 Ra-226 輻照裝置。

**【0102】** 在一態樣中，該設備可進一步包括中子緩和材料。在一態樣中，該中子緩和材料係經組構成定位於該電子中子產生器之融合反應源端與該總成之間。在一態樣中，該中子緩和材料可包括或為石墨、水或重水。

**【0103】** 在一態樣中，控制中子緩和材料之量及幾何性質，以最佳化輻照標靶材料(Gd-157 標靶材料)中之熱中子通量暴露。

**【0104】** 在一態樣中，該輻照標靶材料可包括中子捕獲材料，諸如釷-157(Gd-157)材料，或發射瞬發捕獲伽瑪輻射之具有極高熱中子捕獲橫截面的一些其他材料。在一態樣中，該 Gd-157 材料可包括經富集至具有約 87% 之 Gd-157、至少約 50%、至少約 87% 或介於約 87 % 與 100%

間之 Gd-157 的氧化釷( $Gd_2O_3$ )。該 Gd-157 材料捕獲電子中子產生器所產生的中子並與其相互作用，以生成高能伽瑪輻射。

【0105】 在一態樣中，控制 Gd-157 材料的質量及幾何性質以最佳化由該物體接收的伽瑪劑量速率及能量。

【0106】 在一態樣中，該設備不包括電子中子產生器，且該電子中子產生器係與該裝置分開提供。

【0107】 在一態樣中，提供一種用於生成高能伽瑪輻射之方法。該方法可包括一或多個以下步驟：提供電子中子產生器；藉由該電子中子產生器產生中子通量；將該中子通量引導至輻照標靶材料；及通過該中子通量與該輻照標靶材料之間的相互作用在該輻照標靶材料中生成中子瞬發捕獲伽瑪輻射。在一態樣中，該方法進一步包含將該伽瑪輻射引導至一物體。在一態樣中，該輻照標靶材料係經組構成定位在鄰近於該電子中子產生器的一端，以及該電子中子產生器的末端與該物體之間。

【0108】 在一態樣中，該方法可進一步包括使用經組構成鄰近於且圍繞不鄰近於該輻照標靶材料之該電子中子產生器之側面定位的輻射屏蔽材料，以最小化從未緊鄰於該輻照標靶材料之表面發射的輻射。

【0109】 在一態樣中，該方法可進一步包括在最接近於該輻照標靶材料之該電子中子產生器的末端與該輻照標靶材料之間添加中子緩和材料。

【0110】 在一態樣中，本文揭示一種使用以上產生的高能伽瑪輻射從 Ra-226 生成 Ac-225 的裝置、系統及方法。

【0111】 在一態樣中，該使用高能伽瑪輻射從 Ra-226 生成 Ac-225 的方法可包括一或多個以下步驟：提供電子中子產生器；藉由該電子中子產生器產生中子通量；將該中子通量引導至輻照標靶材料；通過該中子通

量與該輻照標靶材料之間的相互作用在該輻照標靶材料中生成中子瞬發捕獲伽瑪輻射；將該伽瑪輻射引導至待經輻照之 Ra-226 標靶材料；輻照該 Ra-226 標靶材料以於 Ra-226 插入物中自 Ra-226 生成 Ra-225。在一態樣中，該輻照標靶材料係經組構成定位在鄰近於該電子中子產生器的一端，且介於該電子中子產生器的末端與該 Ra-226 標靶材料之間。

**【0112】** 在一態樣中，該方法可進一步包括控制該輻照標靶材料的質量及幾何性質，以最佳化經輻照之 Ra-226 標靶材料所接受的伽瑪劑量速率及強度。

**【0113】** 在一態樣中，該輻照標靶材料係經組構成包括且密封在 Gd-157 插入物中，及該 Ra-226 標靶材料係經組構成包括且密封在 Ra-226 插入物中。

**【0114】** 在一態樣中，該方法進一步包含自伽瑪輻射之輻照移除 Ra-226 插入物；及允許 Ra-226 中之 Ra-225 衰變生成 Ac-225。

**【0115】** 在一態樣中，該方法可進一步包括測量圍繞 Gd-157 插入物及 Ra-226 插入物之伽瑪輻射位準；確定測得的伽瑪輻射位準低於預定位準；自伽瑪輻射移除 Ra-226 插入物；用新鮮的 Ra-226 插入物替換該 Ra-226 插入物；及用新鮮的 Gd-157 插入物替換該 Gd-157 插入物。

**【0116】** 在一態樣中，該方法可進一步包括使用經組構成鄰近於且圍繞不鄰近於該輻照標靶材料之該電子中子產生器之側面定位的輻射屏蔽材料，以最小化從未緊鄰於該輻照標靶材料之表面發射的輻射。

**【0117】** 在一態樣中，該方法可進一步包括在最接近於該輻照標靶材料之該電子中子產生器的末端與該輻照標靶材料之間添加中子緩和材料。

**【0118】** 在一態樣中，該方法可進一步包括控制該中子緩和材料之

量及幾何性質，以最佳化該輻照標靶材料中之中子通量暴露。

【0119】 在一態樣中，該輻照標靶材料具有大約 257000 邦(b)之量的熱中子捕獲橫截面。

【0120】 在一態樣中，該 Ra-226 標靶材料所接收之伽瑪輻射的劑量速率不小於約 625 R/秒或  $2.25 \times 10^6$  R/小時。

【0121】 在本揭示的一態樣中，本文提供一種使用商業核反應器自 Ra-226 生成 Ac-225 的系統、裝置及方法。該系統包含輻照標靶總成。該輻照標靶總成包含：Ra-226 標靶插入及提取裝置；包括輻照標靶材料及輻照標靶固持器之輻照標靶圍堵結構；及具有封閉端彈鼻部之管徑通規外鞘，其中該管徑通規外鞘封閉除頂端外之 Ra-226 標靶插入及提取裝置及該輻照標靶圍堵結構。

【0122】 在一態樣中，該輻照標靶圍堵結構為 Gd-157 圍堵結構。該輻照標靶材料包括 Gd-157 標靶材料。該輻照標靶固持器係 Gd-157 固持器。

【0123】 在一態樣中，該 Ra-226 標靶插入及提取裝置包含：含有 Ra-226 之 Ra-226 標靶材料；封閉及密封該 Ra-226 標靶材料之 Ra-226 固持器；及連接至該 Ra-226 固持器之操作把手。該操作把手有助於將該 Ra-226 標靶材料插入至該 Gd-157 圍堵結構中，以及從該 Gd-157 圍堵結構中提取該 Ra-226 標靶材料。該 Ra-226 固持器封閉且隔絕密封該 Ra-226 標靶材料。中心棒係沿著該 Ra-226 標靶插入及提取裝置的中心軸。該 Ra-226 標靶插入及提取裝置進一步包含在該 Ra-226 標靶插入及提取裝置之頂端處的氣體膨脹間隙。該等氣體膨脹間隙可具有至少 1.0  $\text{cm}^3$  的氣體膨脹體積。此於 Ra-226 標靶插入及提取裝置中具有氣體膨脹間隙的裝置設計係要最大化可從 Gd-157 伽瑪源生成之 Ra-225 的量，並

允許 Ra-226 及在 Ra-226 之輻照期間生成的氣體(諸如氦(He)、氬或其他氣體)膨脹，而不會導致自經密封的 Ra-226 標靶插入及提取裝置排氣。

【0124】 在一態樣中，該 Ra-226 標靶材料係固體，或實壓在該 Ra-226 固持器內的粉末。該 Gd-157 材料係呈固體形式，或係壓實於該 Gd-157 固持器內的粉末。

【0125】 在一態樣中，該輻照標靶總成係呈圓柱體形狀。該 Ra-226 標靶插入及提取裝置係呈圓柱體形狀。該 Gd-157 圍堵結構係呈與該 Ra-226 標靶插入及提取裝置同心的中空圓柱體形狀。該管徑通規外鞘係呈中空圓柱體形狀，其具有封閉且密封除頂端外之 Ra-226 標靶插入及提取裝置及 Gd-157 圍堵結構的封閉端彈鼻部，如圖 6A 所示。該管徑通規外鞘與該 Ra-226 標靶插入及提取裝置及該 Gd-157 圍堵結構同心。在一態樣中，該管徑通規外鞘係由諸如 SS-315 不銹鋼、合金-690 或鈳合金的材料製成。該 Ra-226 固持器 534、該操作把手 524 及該 Gd-157 固持器各自由諸如 SS-315 不銹鋼、合金-690 或鈳合金的材料製成。

【0126】 在一態樣中，該 Gd-157 圍堵結構、該 Ra-226 標靶插入及提取裝置、及該管徑通規鞘可彼此分離，其允許將該 Ra-226 標靶插入及提取裝置插入至該管徑通規中及自其中取出，並安裝新的 Ra-226 標靶插入及提取裝置。當耗乏位準增加超過期望位準時，亦可更換該 Gd-157 圍堵結構。該輻照標靶總成、該標靶插入及提取裝置及 Gd-157 圍堵結構的長度、直徑及其他尺寸係基於在該 Ra-226 標靶材料之可用橫截面區域內待經輻照之 Ra-226 標靶材料的質量來確定。

【0127】 在一態樣中，該系統可進一步包含：商業核反應器，諸如壓水式反應器(PWR)；及於許多壓水式反應器(PWR)設計中常見的可移動式核心內偵測器系統(MIDS)，如由 Heibel 等人 (美國專利第

10,755,829 號('829 專利))所揭示，該案全文以引用的方式併入本文。

**【0128】** 在一態樣中，該輻照標靶總成可呈圓柱體形狀。管徑通規的外徑係由如'829 專利中所揭示之許多壓水式反應器(PWR)設計中常見之可移動式核心內偵測器系統(MIDS)所使用之分裂腔室的最大外徑來確定。可調整該 Ra-226 標靶材料的長度，以達成期望的標靶質量含量從而最大化 Ac-225 生成。

**【0129】** 在一態樣中，該系統進一步包含監測器，以測量在該輻照標靶總成附近之中子通量及/或伽瑪輻射位準，從而允許確定 Ra-225 生成位準及 Gd-157 標靶材料耗乏位準。可使用所測量資料來與預定位準相比，確定是否要更換 Ra-226 標靶插入及提取裝置及/或 Gd-157 圍堵結構。

**【0130】** 在一態樣中，提供一種使用商業核反應器及以上論述之系統自 Ra-226 生成 Ac-225 的方法。該方法包括：產生中子通量；將該中子通量引導至包括輻照標靶材料及輻照標靶固持器的輻照標靶圍堵結構；通過該中子通量與該輻照標靶材料之間的相互作用在該輻照標靶材料中生成中子瞬發捕獲伽瑪輻射；將該伽瑪輻射引導至待經輻照之 Ra-226 標靶材料；輻照該 Ra-226 標靶材料以於該 Ra-226 標靶材料中自 Ra-226 生成 Ra-225。

**【0131】** 在一態樣中，該方法進一步包含自伽瑪輻射移除該 Ra-226 標靶材料且允許該經輻照之 Ra-226 標靶材料中之 Ra-225 衰變生成 Ac-225。

**【0132】** 在一態樣中，該輻照標靶圍堵結構及該 Ra-226 標靶材料包括於如以上所論述的該輻照標靶總成中。

**【0133】** 在一態樣中，該方法進一步包含提供具有反應器核心之核

反應器，諸如壓水式反應器(PWR)或沸水反應器(BWR)，該核反應器具有將該輻照標靶總成遞送至該核反應器之反應器核心的手段。在一態樣中，中子通量係由核反應器產生。

【0134】 在一態樣中，該方法進一步包含測量圍繞該輻照標靶總成之伽瑪輻射位準，以確定 Gd-157 耗乏位準；確定該 Gd-157 耗乏位準高於預定位準；及更換該 Gd-157 圍堵結構；計算該 Ra-225 生成量；確定該 Ra-225 之生成量高於預定量；移除該經輻照之 Ra-226 插入及提取裝置；用新鮮的 Ra-226 插入及提取裝置替換；允許該經輻照之 Ra-226 插入及提取裝置中之 Ra-225 衰變生成 Ac-225。

【0135】 在一態樣中，該方法可進一步包括控制該 Gd-157 標靶材料之質量及幾何性質，以最佳化該經輻照之 Ra-226 標靶材料所接收之伽瑪劑量速率及強度。

【0136】 在一態樣中，該方法可進一步包括在該 Ra-226 插入及提取裝置與該 Gd-157 圍堵結構之間添加中子緩和材料。

【0137】 在一態樣中，該方法可進一步包括控制該中子緩和材料之量及幾何性質，以最佳化該輻照標靶材料中之中子通量暴露。

【0138】 本揭示之其他態樣提供於以下條項。

【0139】 條項 1. 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之裝置，該裝置包含：電子中子產生器，其用以自該電子中子產生器之發射端產生熱中子通量；輻照標靶插入物，其包含回應於暴露至由該電子中子產生器所產生之該熱中子通量而產生伽瑪輻射的輻照標靶材料，該輻照標靶插入物定位在接近該電子中子產生器的該發射端；及 Ra-226 插入物，其包含回應於暴露至由該輻照標靶材料所產生之該伽瑪輻射而生成 Ra-225 的 Ra-

226 標靶材料。

【0140】 條項 2. 如條項 1 之裝置，其進一步包含末端中子緩和劑，該末端中子緩和劑包含中子緩和材料以調節該輻照標靶材料之暴露至該熱中子通量，該末端中子緩和劑定位於該輻照標靶插入物與該電子中子產生器之該發射端之間。

【0141】 條項 3. 如條項 1 至 2 中任一項之裝置，其中該輻照標靶材料包含釷-157(Gd-157)材料，且其中該輻照標靶插入物為 Gd-157 插入物。

【0142】 條項 4. 如條項 1 至 3 中任一項之裝置，其中該 Gd-157 材料包括經富集至包含至少約 80 wt.% 至 100 wt.% 之 Gd-157 的氧化釷 ( $Gd_2O_3$ )。

【0143】 條項 5. 如條項 1 至 4 中任一項之裝置，其中該  $Gd_2O_3$  經富集至包含約 87 wt.% 之 Gd-157。

【0144】 條項 6. 如條項 1 至 5 中任一項之裝置，其中該輻照標靶材料係經組構成向該 Ra-226 插入物遞送最佳化的伽瑪劑量速率及強度。

【0145】 條項 7. 如條項 1 至 6 中任一項之裝置，其中該電子中子產生器係第一電子中子產生器，其中該末端中子緩和劑係第一末端中子緩和劑，其中該 Gd-157 插入物係第一 Gd-157 插入物，且其中 Ra-226 插入物係第一 Ra-226 插入物，該裝置進一步包含：第二電子中子產生器；第二末端中子緩和劑，其包含該中子緩和材料；第二 Gd-157 插入物及第三 Gd-157 插入物，其各自包含該 Gd-157 材料；第二 Ra-226 插入物，其包含該 Ra-226 標靶材料；及第一、第二、第三、及第四內部中子緩和劑，其各自包含該中子緩和材料；其中該第一末端中子緩和劑鄰近於

該電子中子產生器，該第一 Gd-157 插入物鄰近於該末端中子緩和劑，該第一內部中子緩和劑鄰近於該第一 Gd-157 插入物，該第一 Ra-226 插入物鄰近於該第一內部中子緩和劑；該第二內部中子緩和劑鄰近於該第一 Ra-226 插入物，該第二 Gd-157 插入物鄰近於該第二內部中子緩和劑；該第三內部中子緩和劑鄰近於該第二 Gd-157 插入物，該第二 Ra-226 插入物鄰近於該第三內部中子緩和劑，該第四內部中子緩和劑鄰近於該第二 Ra-226 插入物，該第三 Gd-157 插入物鄰近於該第四內部中子緩和劑，該第二末端中子緩和劑鄰近於該第三 Gd-157 插入物，及該第二電子中子產生器鄰近於該第二末端中子緩和劑。

【0146】條項 8. 如條項 1 至 7 中任一項之裝置，其中該第一、該第二、及該第三 Gd-157 插入物中之各者及該第一及該第二 Ra-226 插入物中之各者係可移除地插入至該裝置中。

【0147】條項 9. 如條項 1 至 8 中任一項之裝置，其進一步包含經結構以測量伽瑪輻射之位準來確定該 Gd-157 材料之耗乏位準或該 Ra-225 之生成量中之至少一者的監測器。

【0148】條項 10. 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之方法，該方法包含：使用電子中子產生器產生中子通量；藉由將輻照標靶材料暴露於該中子通量來生成伽瑪輻射；及藉由用該伽瑪輻射輻照包含 Ra-226 標靶材料的 Ra-226 插入物來生成 Ra-225。

【0149】條項 11. 如條項 10 之方法，其進一步包含使用至少部分地圍繞該電子中子產生器的輻射屏蔽材料來屏蔽該中子通量。

【0150】條項 12. 如條項 10 至 11 中任一項之方法，其進一步包括使用位於該電子中子產生器與該輻照標靶材料之間的中子緩和材料來調節該中子通量。

【0151】 條項 13. 如條項 10 至 12 中任一項之方法，其進一步包含使用經組構成測量伽瑪輻射之位準的監測器來監測該輻照標靶材料之耗乏位準或 Ac-225 生成量之至少一者。

【0152】 條項 14. 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之系統，該系統包含：核反應器，其包含反應器核心；及可插入至該反應器核心中之輻照標靶總成，該輻照標靶總成包含：Ra-226 標靶插入及提取裝置，其包含：包含 Ra-226 之 Ra-226 材料；及 Ra-226 固持器，其封閉及密封該 Ra-226 材料；輻照標靶圍堵結構，其包含：輻照標靶材料；及輻照標靶固持器，其封閉及密封該輻照標靶材料，其中該輻照標靶圍堵結構至少部分地圍繞該 Ra-226 標靶插入及提取裝置；及管徑通規外鞘，其包含封閉端，其中該管徑通規外鞘至少部分地圍繞該輻照標靶圍堵結構。

【0153】 條項 15. 如條項 14 之系統，其中該輻照標靶材料包含 Gd-157 材料。

【0154】 條項 16. 如條項 14 至 15 中任一項之系統，其中該輻照標靶總成進一步包含至少一個氣體膨脹間隙。

【0155】 條項 17. 如條項 14 至 16 中任一項之系統，其中該 Ra-226 材料及該輻照標靶材料係呈粉末形式。

【0156】 條項 18. 如條項 14 至 17 中任一項之系統，其中該 Ra-226 標靶插入及提取裝置係呈圓柱形狀，其中該輻照標靶圍堵結構係呈圓柱形狀且與該 Ra-226 標靶插入及提取裝置同心，且其中該管徑通規外鞘係呈圓柱形狀且包含封閉該 Ra-226 標靶插入及提取裝置及該輻照標靶圍堵結構的封閉端。

【0157】 條項 19. 如條項 14 至 18 中任一項之系統，其進一步包含一或多個監測器，其經組構以測量接近於該輻照標靶總成之伽瑪輻射

位準來確定 Ra-225 生成量或輻照標靶材料耗乏位準之至少一者。

【0158】 條項 20. 如條項 14 至 19 中任一項之系統，其中該 Ra-226 標靶插入及提取裝置及該輻照標靶圍堵結構各自係可移除地插入至該輻照標靶總成中。

【0159】 條項 21. 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之方法，該方法包含：將輻照標靶總成插入至核反應器之核心內，該輻照標靶總成包含 Ra-226 材料及輻照標靶材料；在該核反應器之該核心內產生中子通量；藉由將輻照標靶材料暴露至該中子通量而生成伽瑪輻射；及藉由用該伽瑪輻射輻照該 Ra-226 來生成 Ra-225。

【0160】 條項 22. 如條項 21 之方法，其進一步包括：藉由監測接近於該輻照標靶總成之伽瑪輻射之位準來確定 Ra-225 生成量或輻照標靶材料耗乏位準之至少一者。

【0161】 條項 23. 如條項 21 至 22 中任一項之方法，其進一步包含：確定該輻照標靶材料耗乏位準滿足預定臨限值；及經由自該輻照標靶總成移除該輻照標靶材料並將新的輻照標靶材料插入至該輻照標靶總成中來替換該輻照標靶。

【0162】 條項 24. 如條項 21 至 23 中任一項之方法，其進一步包括：確定該 Ra-225 生成量滿足預定臨限值；自該輻照標靶總成移除該 Ra-226 標靶材料；及將新的 Ra-226 標靶材料插入至該輻照標靶總成中。

【0163】 條項 25. 如條項 21 至 24 中任一項之方法，其中該輻照標靶材料包含 Gd-157。

【0164】 本文中所提及及/或列於任何申請資料表(Application Data Sheet)中的所有專利、專利申請案、公開案或其他揭示材料皆特此以全文引用之方式併入，如同每一個別參考文獻分別以引用方式明確地

併入一般。據稱以引用之方式併入本文中所有參考文獻及其任何材料或其部分僅在併入之材料不與本揭示中所闡述之現有定義、陳述或其他揭示材料矛盾之程度上併入本文中。因而且在必要程度上，如本文中所闡述之揭示內容取代以引用方式併入本文中任何矛盾的材料且以本申請案中明確闡述之揭示內容為準。

**【0165】** 已參考各種例示性及說明性態樣描述本揭示。本文中所描述之態樣應理解為提供本揭示內容之各種態樣之不同細節的說明性特徵；且因此，除非另外指定，否則應理解，在可能之情況下，所揭示態樣之一或多個特徵、元件、組件、組份、成份、結構、模組及/或態樣可與或相對於所揭示態樣之一或多個其他特徵、元件、組件、組份、成份、結構、模組及/或態樣組合、分開、互換及/或重新配置，而不脫離本揭示內容之範圍。因此，一般熟悉本技藝者將認識到，可在不脫離本揭示範圍之情況下進行例示性態樣中之任一者的各種替代、修改或組合。另外，熟悉本技藝者將認識到或能夠在審閱本說明書後僅使用常規實驗確定本文中所描述之本揭示之各種態樣的許多等效物。因此，本揭示不受各種態樣之描述限制，而是受申請專利範圍限制。

**【0166】** 熟悉本技藝者將認識到，一般而言，本文中且尤其在所附申請專利範圍中(例如，所附申請專利範圍之主體)所使用之術語一般意欲作為「開放式(open)」術語(例如，術語「包括(including)」應解譯為「包括但不限於」，術語「具有(having)」應解譯為「至少具有」，術語「包括(includes)」應解譯為「包括但不限於」等)。熟悉本技藝者應進一步理解，若期望特定數目之所引入申請專利範圍敘述，則此意圖將明確敘述於申請專利範圍中，且在無此敘述之情況下不存在此意圖。舉例而言，作為對理解之輔助，以下隨附申請專利範圍可含有介紹性片語「至少一個」及

「一或多個」之使用以引入申請專利範圍陳述。然而，此類片語之使用不應視為暗示由不定冠詞「一(a)」或「一個(an)」對申請專利範圍敘述之引介將含有此類所引介申請專利範圍敘述之任何特定申請專利範圍限制於僅含有一個此類敘述的申請專利範圍，即使當同一申請專利範圍包括引介片語「一或多個」或「至少一個」及諸如「一(a)」或「一個(an)」之不定冠詞時(例如，「一(a)」及/或「一個(an)」應通常解譯為意謂「至少一個」或「一或多個」)；此情況同樣適用於用以引介申請專利範圍敘述之不定冠詞的使用。

**【0167】** 此外，即使明確地敘述特定數目之所引介申請專利範圍敘述，但熟悉本技藝者將認識到，此類敘述通常應解譯為意謂至少所敘述之數目(例如，不具有其他修飾語的無修飾敘述「兩個敘述」通常意謂至少兩個敘述或兩個或更多個敘述)。此外，在使用類似於「A、B及C中之至少一者等」之公約的彼等情況下，一般此類構造意欲為熟悉本技藝者應瞭解公約之意義(例如，「具有A、B及C中之至少一者的系統」將包括但不限於具有僅A、僅B、僅C、A及B一起、A及C一起、B及C一起及/或A、B及C一起等的系統)。在使用類似於「A、B或C中之至少一者等」之公約的彼等情況下，一般此類構造意欲為熟悉本技藝者應瞭解公約之意義(例如，「具有A、B或C中之至少一者的系統」將包括但不限於具有僅A、僅B、僅C、A及B一起、A及C一起、B及C一起及/或A、B及C一起等的系統)。熟悉本技藝者將進一步理解，除非上下文另外規定，否則無論在描述內容、申請專利範圍或圖式中，通常呈現兩個或多於兩個替代性術語之分離性字組及/或片語應理解為涵蓋包括該等術語中之一者、該等術語中之任一者或兩種術語之可能性。舉例而言，片語「A或B」應通常理解為包括「A」或「B」或「A及B」之可能性。

【0168】 關於所附申請專利範圍，熟習本技藝者應瞭解，其中所列舉之操作通常可以任何次序執行。此外，雖然請求項陳述係以順序呈現，但應理解，可以所描述者以外的其他次序來執行各種操作，或可同時執行各種操作。除非上下文另外規定，否則此類替代排序之實例可包括重疊、交錯、中斷、重新排序、遞增、準備、補充、同時、反向或其他變異排序。此外，除非上下文另外規定，否則如「回應於」、「與...相關」之術語或其他過去時態形容詞通常並不意欲排除此類變型。

【0169】 值得注意，對「一個態樣」、「一態樣」、「一範例」、「一個範例」及類似者之任何參考意謂結合該態樣所描述之特定特徵、結構或特性包括於至少一個態樣中。因此，片語「在一個態樣中」、「在一態樣中」、「在一範例中」及「在一個範例中」貫穿本說明書在各處之出現未必皆參考同一態樣。此外，在一或多個態樣中以任何適當方式組合特定特徵、結構或特性。

【0170】 如本文中所使用，除非上下文另外清楚地規定，否則單數形式「一(a)」、「一個(an)」及「該(the)」包括複數個參考物。

【0171】 除非另外明確地陳述，否則本文中所使用之方向性片語，諸如但不限於頂部、底部、左、右、下部、上部、前部、背部及其變化形式，應關於隨附圖式中所展示之元件之定向且不對申請專利範圍造成限制。

【0172】 除非另有特別指定，否則本揭示中所使用之術語「約」或「大約」意指一特定值憑藉熟悉本技藝者所確定之可接受誤差，該誤差部分地取決於數值的測量或確定方式。在某些態樣中，術語「約」或「大約」意指在 1、2、3 或 4 個標準偏差內。在某些態樣中，術語「約」或「大約」意指在一給定值或範圍的 50%、200%、105%、100%、9%、8%、

7%、6%、5%、4%、3%、2%、1%、0.5%或0.05%內。

【0173】 在本說明書中，除非另有指示，否則所有數值參數應理解為在所有情況下均通過術語「約」作為開頭和修飾，其中數值參數具有用於確定參數數值之基礎測量技術的固有可變性特徵。最起碼而言，且不試圖將均等論之應用限制於申請專利範圍之範疇，本文中所描述之每一數值參數應至少根據所列舉有效數字的數目且通過應用普通四捨五入技術來詮釋。

【0174】 本文中所列舉之任何數值範圍包括在列舉範圍內所涵蓋之全部子範圍。舉例而言，範圍「1 至 100」包括介於(且包括)所列舉最小值 1 及所列舉最大值 100 之間(亦即，具有等於或大於 1 之最小值及等於或小於 100 之最大值)的所有子範圍。此外，本文中所列舉之全部範圍包括所列舉範圍之端點。舉例而言，範圍「1 至 100」包括端點 1 及 100。本說明書中所列舉之任何最大數值限制旨在包括其中所涵蓋之全部較低數值限制，且本說明書中所列舉之任何最小數值限制旨在包括其中所涵蓋之全部較高數值限制。因此，申請人保留修改本說明書(包括申請專利範圍)之權利，以明確地列舉涵蓋在明確列舉範圍內之任何子範圍。本說明書本質上描述所有此類範圍。

【0175】 術語「包含(comprise)」(及包含之任何形式，諸如「包含(comprises)」及「包含(comprising)」)、「具有(have)」(及具有之任何形式，諸如「具有(has)」及「具有(having)」)、「包括(include)」(及包括之任何形式，諸如「包括(includes)」及「包括(including)」)以及「含有(contain)」(及含有之任何形式，諸如「含有(contains)」及「含有(containing)」)為開放式連綴動詞。因此，一種「包含」、「具有」、「包括」或「含有」一或多個元件之系統具有彼等一或多個元件，但不限於僅

擁有彼等一或多個元件。同樣地，「包含」、「具有」、「包括」或「含有」一或多個特徵之系統、裝置或設備之元件具有彼等一或多個特徵，但不限於僅擁有彼等一或多個特徵。

**【0176】** 在描述本申請案之態樣及具體例中，為了清楚起見，使用特定術語。然而，本揭示並不意欲受限於經如此選定的特定術語。不應將本說明書中之內容視為限制本揭示之範圍。

**【0177】** 所呈現之所有實例均為代表性與非限制性的。如熟悉本技藝者根據以上教示所當理解，上述態樣及具體例可經修改或改變，而不脫離本揭示。因此，應理解，在申請專利範圍及其等效物之範疇中，本揭示可以不同於明確描述者的方式實施。

**【0178】** 不經進一步闡述，咸信熟習本技藝者可使用前述描述將所主張之揭示發揮至其最大程度。本文所揭示之實例、態樣及具體例應僅被解釋為例示性而不以任何方式限制本揭示之範疇。熟悉本技藝者將顯而易見，可對上述態樣及具體例之細節進行各種改變及修飾而不脫離所論述之基本原理。換言之，上文描述中具體揭示之態樣及具體例的各種修改及改良係在所附申請專利範圍之範疇內。舉例而言，可考慮所描述之各種態樣及具體例之特徵的任何合適組合。

### **【符號說明】**

10:可伸縮套管

12:可移動式偵測器

14:反應器核心

16:反應器容器

18:混凝土屏蔽區域

- 20:套管密封台
- 22:導管
- 24:驅動單元
- 26:限制開關總成
- 28:5 路徑旋轉轉移裝置
- 30:10 路徑旋轉轉移裝置
- 32:隔離閥
- 36:驅動器纜線總成
- 38:標靶固持器元件
- 40:驅動纜線
- 42:信號引線
- 43:標靶材料固持器
- 44:自供電偵測器元件
- 45:蓋
- 46:環夾
- 47:極薄金屬網狀物
- 48:球卡環配置；球或公部分
- 50:球卡環配置；卡環部分
- 52:連接器插腳
- 100:裝置
- 102:中子產生器
- 104:中子捕獲儲集器
- 105:伽瑪輻射
- 106:屏蔽件

107:中子通量場  
108:中子緩和劑  
110:標靶  
400:系統  
402:電子中子產生器  
404:中子緩和劑  
406:Gd-157 碟  
408:Ra-226 碟  
410:Ra-226 固持器  
412:操作棒  
414:Ra-226 插入物  
416:氣體膨脹間隙  
418:氣體膨脹間隙  
420:輻照標靶插入物  
430:Ra-226 輻照裝置  
500:輻照標靶總成  
506:輻照標靶材料  
508:Ra-226 標靶材料  
518:氣體膨脹間隙  
522:輻照標靶物固持器  
524:操作把手  
526:中心棒  
528:第一壁  
530:管徑通規外鞘

532:第二壁

534:Ra-226 固持器

536:第三壁

540:Ra-226 標靶插入及提取裝置

550:輻照標靶圍堵結構

## 【發明申請專利範圍】

【請求項 1】 一種用於自鐳-226(Ra-226)生成銦-225(Ac-225)之裝置，該裝置包括：

電子中子產生器，其用以自該電子中子產生器之發射端產生熱中子通量；

輻照標靶插入物，其包含回應於暴露至由該電子中子產生器所產生之該熱中子通量而產生伽瑪輻射的輻照標靶材料，該輻照標靶插入物定位在接近於該電子中子產生器的該發射端；及

Ra-226 插入物，其包含回應於暴露至由該輻照標靶材料所產生之該伽瑪輻射而生成 Ra-225 的 Ra-226 標靶材料。

【請求項 2】 如請求項 1 之裝置，其進一步包含末端中子緩和劑，該末端中子緩和劑包含中子緩和材料以調節該輻照標靶材料之暴露至該熱中子通量，該末端中子緩和劑定位於該輻照標靶插入物與該電子中子產生器之該發射端之間。

【請求項 3】 如請求項 2 之裝置，其中該輻照標靶材料包含釷-157(Gd-157)材料，且其中該輻照標靶插入物為 Gd-157 插入物。

【請求項 4】 如請求項 3 之裝置，其中該 Gd-157 材料包括經富集至包含至少約 80 wt.%至 100 wt.%之 Gd-157 的氧化釷( $Gd_2O_3$ )。

【請求項 5】 如請求項 4 之裝置，其中該  $Gd_2O_3$  經富集至包含約 87 wt.%之 Gd-157。

【請求項 6】 如請求項 1 之裝置，其中該輻照標靶材料係經組構成向該 Ra-226 插入物遞送最佳化的伽瑪劑量速率及強度。

【請求項 7】 如請求項 3 之裝置，其中該電子中子產生器係第一電子中子產生器，其中該末端中子緩和劑係第一末端中子緩和劑，其中該 Gd-157 插入物係第一 Gd-157 插入物，且其中 Ra-226 插入物係第一 Ra-226 插入物，該裝置進一步包含：

第二電子中子產生器；

第二末端中子緩和劑，其包含該中子緩和材料；

第二 Gd-157 插入物及第三 Gd-157 插入物，其各自包含該 Gd-157 材料；

第二 Ra-226 插入物，其包含該 Ra-226 標靶材料；及

第一、第二、第三、及第四內部中子緩和劑，其各自包含該中子緩和材料；

其中該第一末端中子緩和劑鄰近於該電子中子產生器，該第一 Gd-157 插入物鄰近於該末端中子緩和劑，該第一內部中子緩和劑鄰近於該第一 Gd-157 插入物，該第一 Ra-226 插入物鄰近於該第一內部中子緩和劑；該第二內部中子緩和劑鄰近於該第一 Ra-226 插入物，該第二 Gd-157 插入物鄰近於該第二內部中子緩和劑；該第三內部中子緩和劑鄰近於該第二 Gd-157 插入物，該第二 Ra-226 插入物鄰近於該第三內部中子緩和劑，該第四內部中子緩和劑鄰近於該第二 Ra-226 插入物，該第三 Gd-157 插入物鄰近於該第四內部中子緩和劑，該第二末端中子緩和劑鄰近於該第三 Gd-157 插入物，及該第二電子中子產生器鄰近於該第二末端

中子緩和劑。

【請求項 8】 如請求項 7 之裝置，其中該第一、該第二、及該第三 Gd-157 插入物中之各者及該第一及該第二 Ra-226 插入物中之各者係可移除地插入至該裝置中。

【請求項 9】 如請求項 1 之裝置，其進一步包含經組構以測量伽瑪輻射之位準來確定該 Gd-157 材料之耗乏位準或該 Ra-225 之生成量中之至少一者的監測器。

【請求項 10】 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之方法，該方法包含：

使用電子中子產生器來產生中子通量；

藉由將輻照標靶材料暴露於該中子通量來生成伽瑪輻射；及

藉由用該伽瑪輻射輻照包含 Ra-226 標靶材料的 Ra-226 插入物來生成 Ra-225。

【請求項 11】 如請求項 10 之方法，其進一步包含使用至少部分地圍繞該電子中子產生器的輻射屏蔽材料來屏蔽該中子通量。

【請求項 12】 如請求項 10 之方法，其進一步包括使用位於該電子中子產生器與該輻照標靶材料之間的中子緩和材料來調節該中子通量。

【請求項 13】 如請求項 10 之方法，其進一步包含使用經組構成測

量伽瑪輻射之位準的監測器來監測該輻照標靶材料之耗乏位準或 Ac-225 生成量之至少一者。

**【請求項 14】** 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 的系統，該系統包括：

核反應器，其包含反應器核心，其用以產生熱中子通量；及

可插入至該反應器核心中之輻照標靶總成，該輻照標靶總成包含：

Ra-226 標靶插入及提取裝置，其包含：

包含 Ra-226 之 Ra-226 材料；及

Ra-226 固持器，其封閉及密封該 Ra-226 材料；

輻照標靶圍堵結構，其包含：

輻照標靶材料，其回應暴露至由該反應器核心所產生之該熱中子通量而產生伽瑪輻射，其中該 Ra-226 材料回應暴露至由該輻照標靶材料所產生之該伽瑪輻射而生成 Ra-225；及

輻照標靶固持器，其封閉及密封該輻照標靶材料，其中該輻照標靶圍堵結構至少部分地圍繞該 Ra-226 標靶插入及提取裝置；及

管徑通規外鞘，其包含封閉端，其中該管徑通規外鞘至少部分地圍繞該輻照標靶圍堵結構。

**【請求項 15】** 如請求項 14 之系統，其中該輻照標靶材料包含 Gd-157 材料。

**【請求項 16】** 如請求項 14 之系統，其中該輻照標靶總成進一步包

含至少一個氣體膨脹間隙。

【請求項 17】 如請求項 15 之系統，其中該 Ra-226 材料及該輻照標靶材料係呈粉末形式。

【請求項 18】 如請求項 14 之系統，其中該 Ra-226 標靶插入及提取裝置係呈圓柱形狀，其中該輻照標靶圍堵結構係呈圓柱形狀且與該 Ra-226 標靶插入及提取裝置同心，且其中該管徑通規外鞘係呈圓柱形狀且包含封閉該 Ra-226 標靶插入及提取裝置及該輻照標靶圍堵結構的封閉端。

【請求項 19】 如請求項 15 之系統，其進一步包含一或多個監測器，該等監測器經組構以測量接近於該輻照標靶總成之伽瑪輻射位準來確定 Ra-225 生成量或輻照標靶材料耗乏位準之至少一者。

【請求項 20】 如請求項 15 之系統，其中該 Ra-226 標靶插入及提取裝置及該輻照標靶圍堵結構各自係可移除地插入至該輻照標靶總成中。

【請求項 21】 一種用於自 Ra-226 生成 Ac-225 之方法，該方法包含：

將輻照標靶總成插入至核反應器之核心中，該輻照標靶總成包含 Ra-226 材料及輻照標靶材料；

在該核反應器之該核心中產生中子通量；

藉由將該輻照標靶材料暴露至該中子通量而生成伽瑪輻射；及  
藉由用該伽瑪輻射輻照該 Ra-226 材料來生成 Ra-225。

【請求項 22】 如請求項 21 之方法，其進一步包含：

藉由監測接近於該輻照標靶總成之伽瑪輻射之位準來確定 Ra-225  
生成量或輻照標靶材料耗乏位準之至少一者。

【請求項 23】 如請求項 22 之方法，其進一步包含：

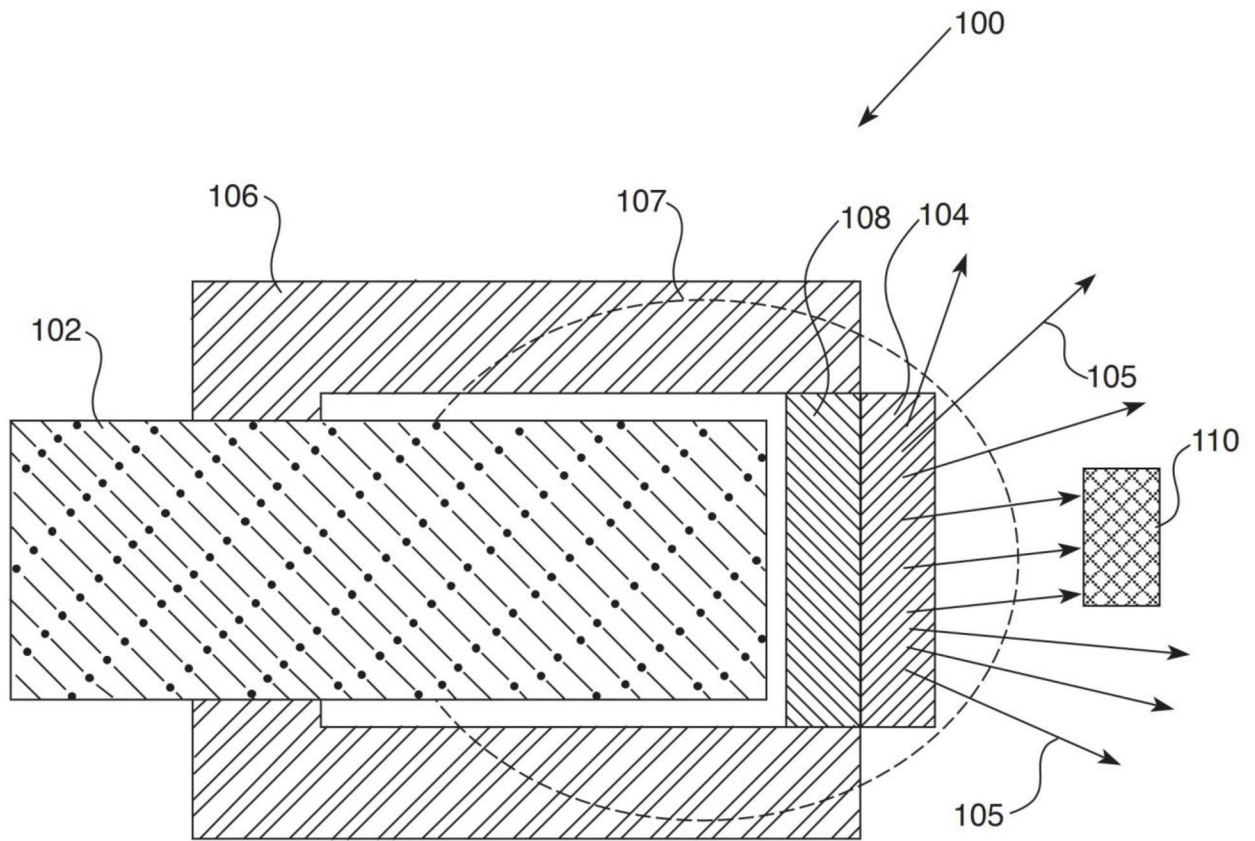
確定該輻照標靶材料耗乏位準滿足預定臨限值；及  
經由自該輻照標靶總成移除該輻照標靶材料並將新的輻照標靶材料  
插入至該輻照標靶總成中來替換該輻照標靶。

【請求項 24】 如請求項 22 之方法，其進一步包含：

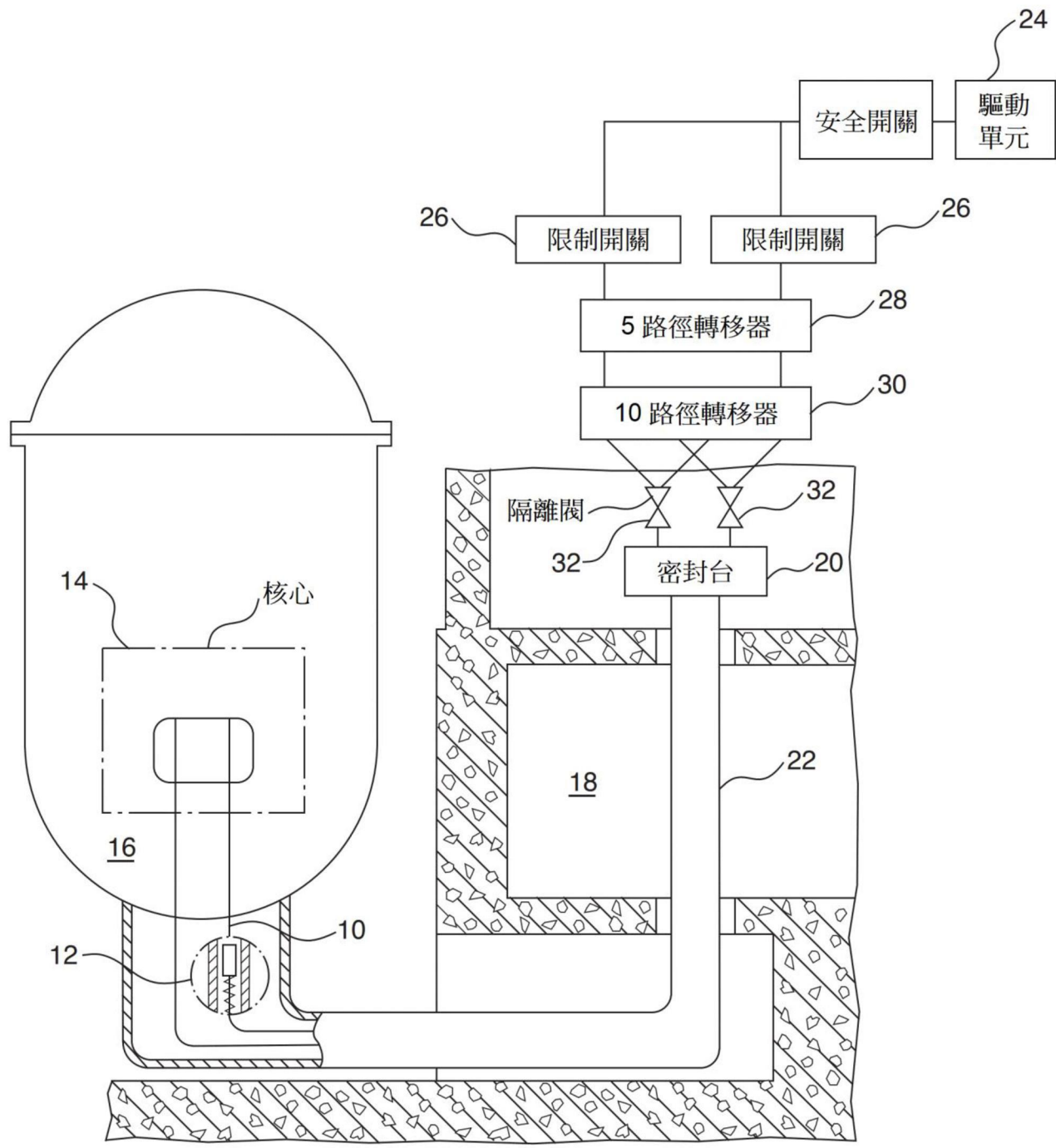
確定該 Ra-225 生成量滿足預定臨限值；  
自該輻照標靶總成移除該 Ra-226 標靶材料；及  
將新的 Ra-226 標靶材料插入至該輻照標靶總成中。

【請求項 25】 如請求項 21 之方法，其中該輻照標靶材料包含 Gd-  
157。

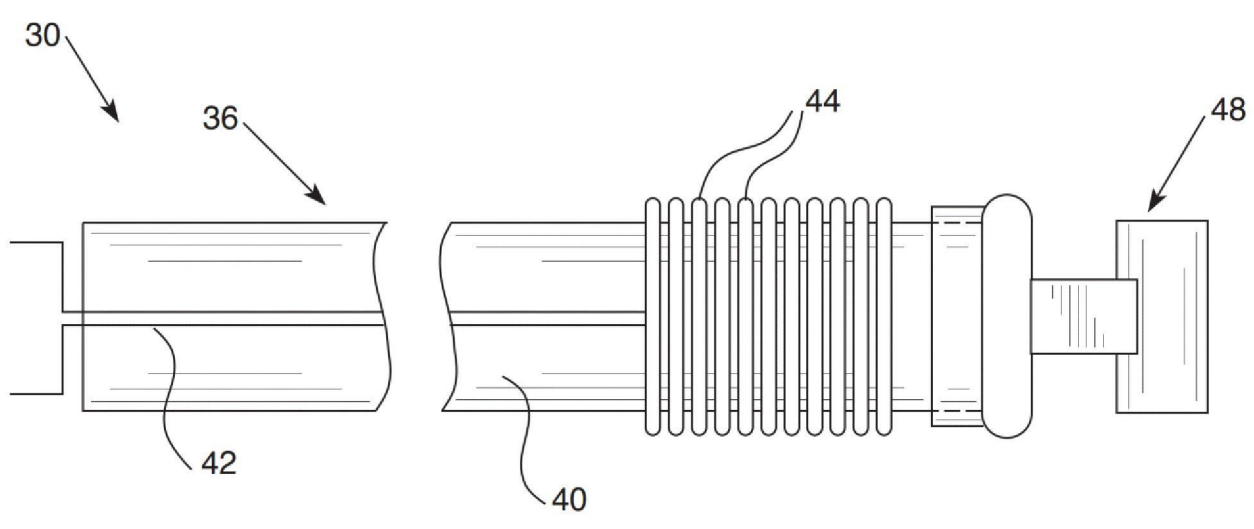
【發明圖式】



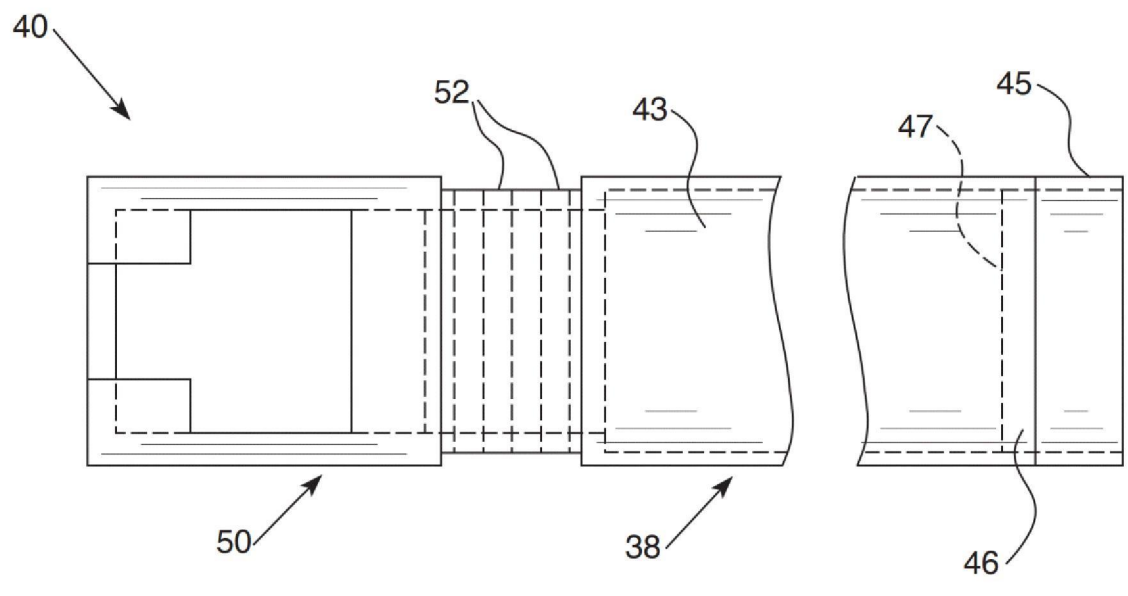
【圖 1】



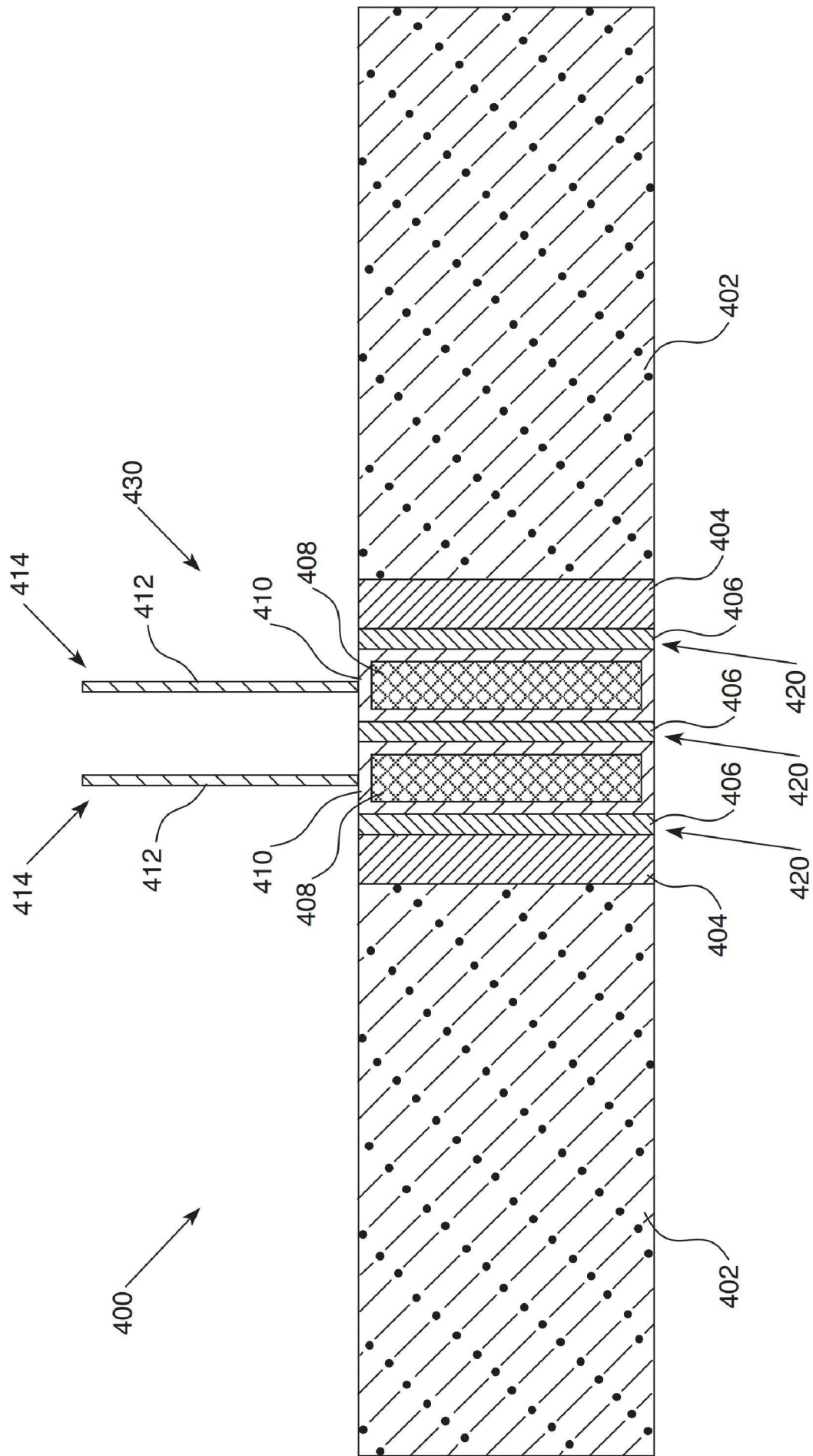
【圖 2】



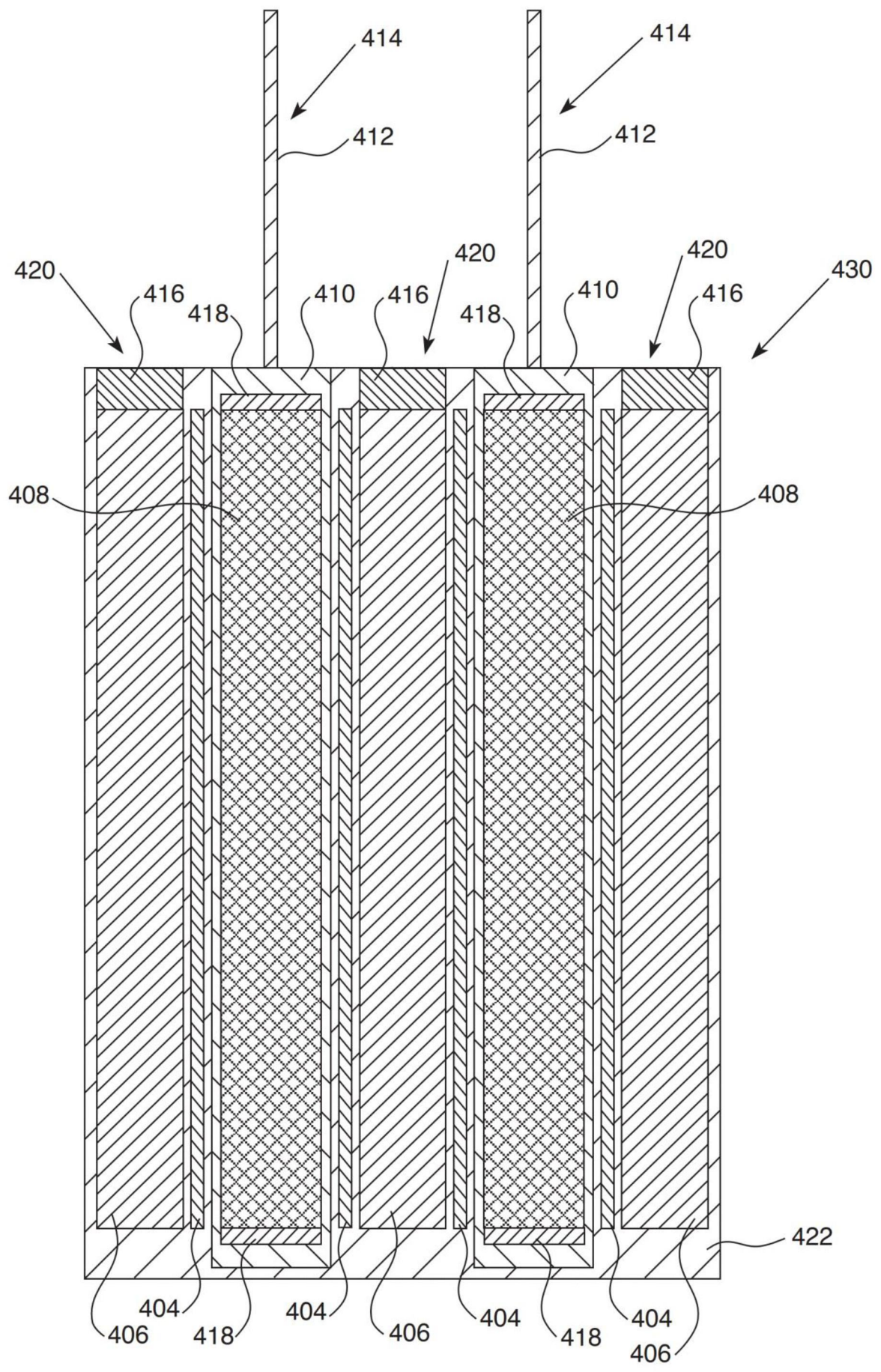
【圖 3】



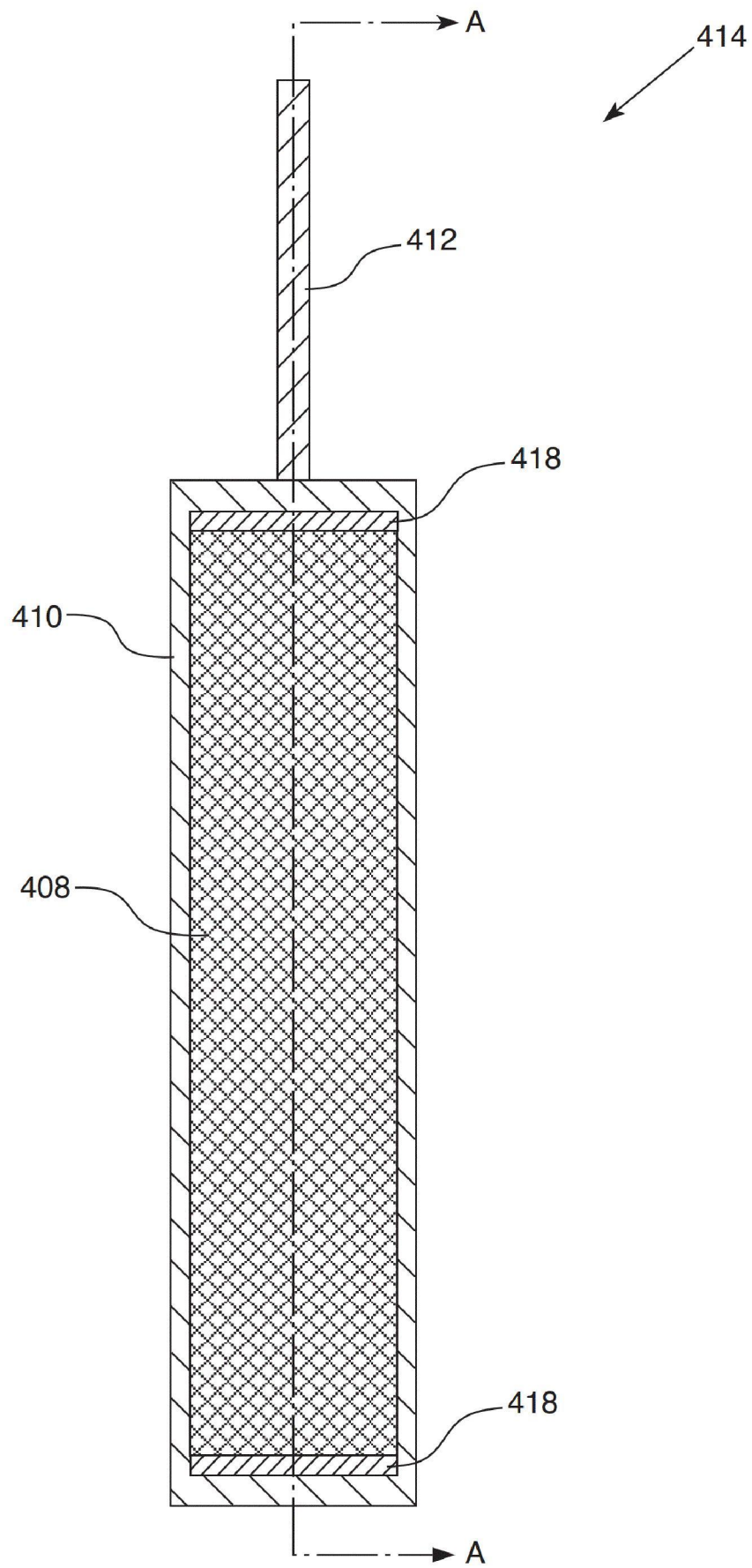
【圖 4】



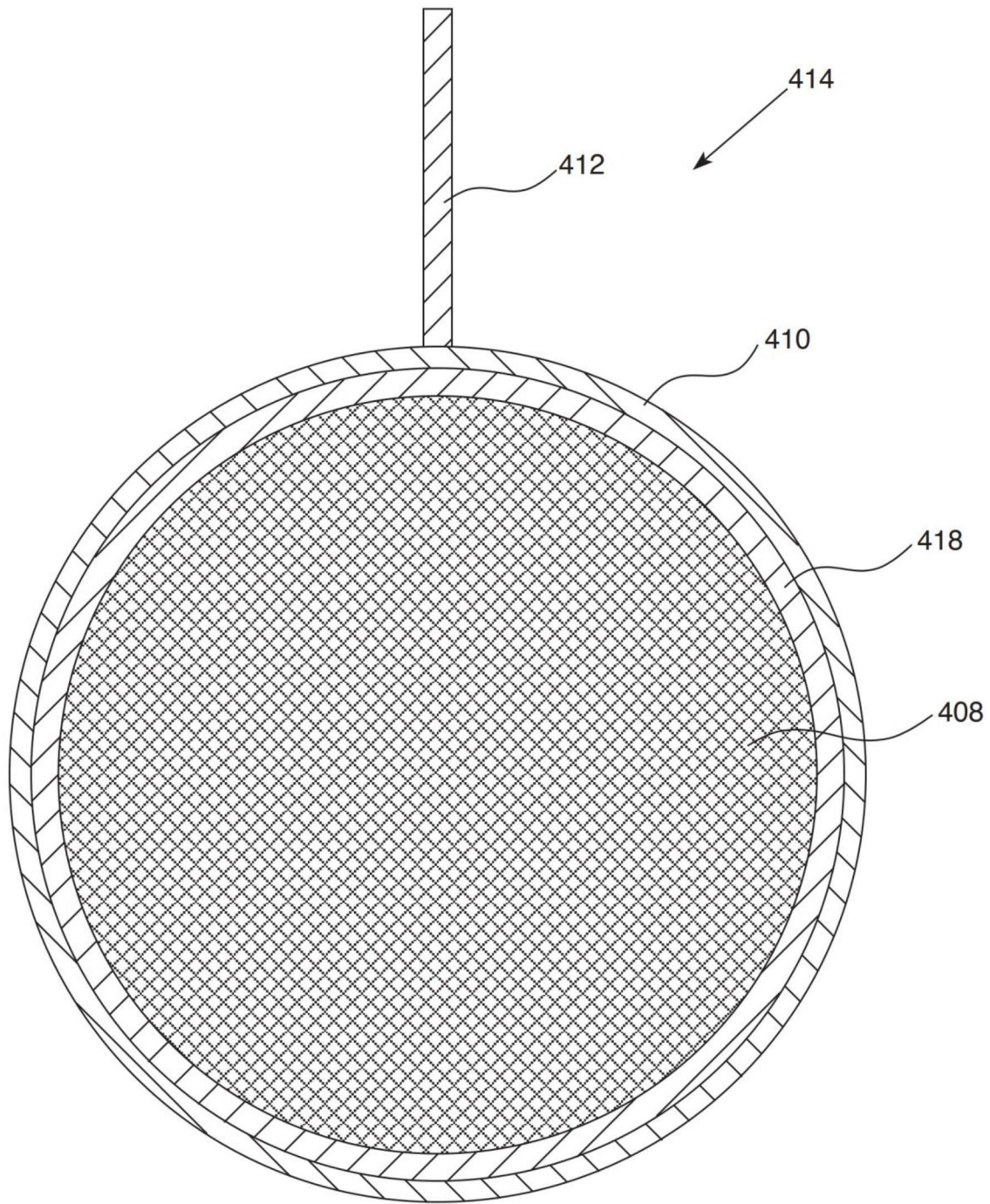
【圖 5A】



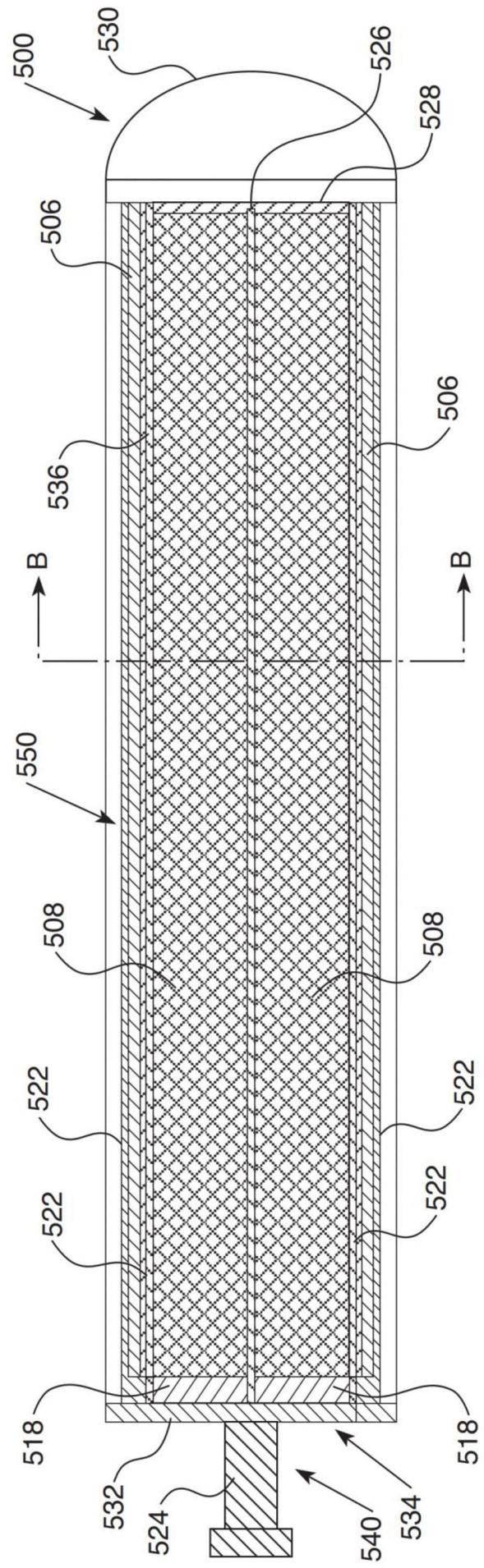
【圖 5B】



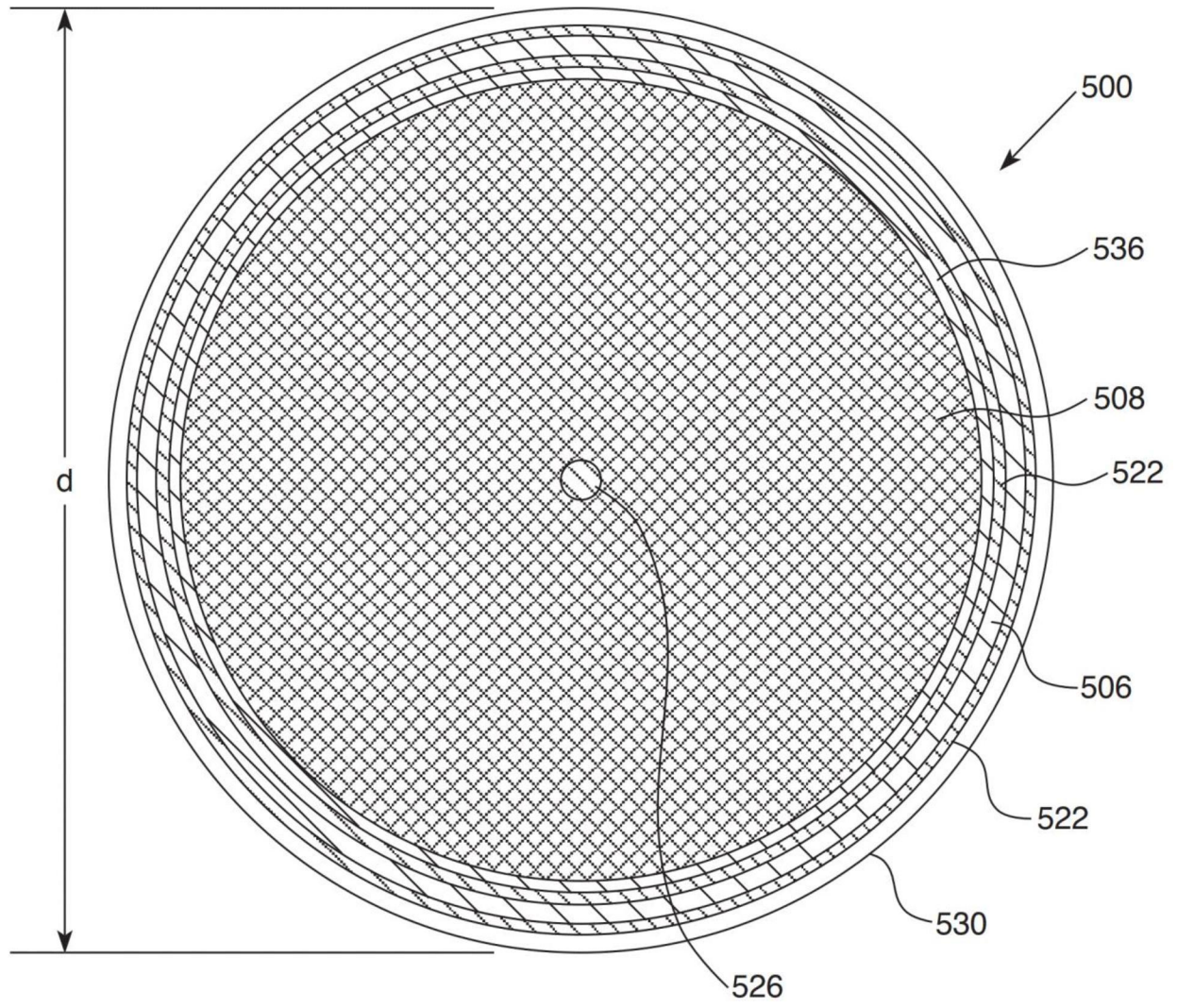
【圖 5C】



【圖 5D】



【圖 6A】



【圖 6B】