



(21)申請案號：105136049

(22)申請日：中華民國 105 (2016) 年 11 月 04 日

(51)Int. Cl.：

G21G1/12 (2006.01)

G21K5/04 (2006.01)

G21K5/08 (2006.01)

G21K5/10 (2006.01)

(30)優先權：2015/11/06

歐洲專利局

15193337.1

(71)申請人：A S M L 荷蘭公司 (荷蘭) ASML NETHERLANDS B. V. (NL)

荷蘭

(72)發明人：德 賈格 皮耶特 威廉 荷曼 DE JAGER, PIETER WILLEM HERMAN (NL)；
畢瓊斯瑪 史博克 BIJLSMA, SIPKE (NL)；佛利恩斯 歐勒夫 華德瑪 佛勒迪
米爾 FRIJNS, OLAV WALDEMAR VLADIMIR (NL)；倪祺佩洛 安得列 亞歷山
卓維克 NIKIPELOV, ANDREY ALEXANDROVICH (RU)；添 凱特 尼可拉斯
TEN KATE, NICOLAAS (NL)；達克森 安東尼斯 瑟多斯 安那 瑪利亞
DERKSEN, ANTONIUS THEODORUS ANNA MARIA (NL)；凡司沛 賈古柏 喬
漢納 李奧那多 漢德力克 VERSPAY, JACOBUS JOHANNUS LEONARDUS
HENDRICUS (NL)；蘭博根 羅博特 嘉博爾 瑪利亞 LANSBERGEN, ROBERT
GABRIEL MARIA (NL)；卡斯特蘭 奧克約 亞莉安娜 安娜特 KASTELIJN,
AUKJE ARIANNE ANNETTE (NL)

(74)代理人：林嘉興

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：75 項 圖式數：21 共 92 頁

(54)名稱

放射性同位素生產

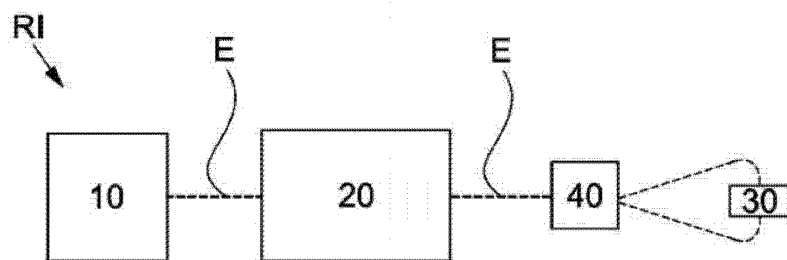
RADIOISOTOPE PRODUCTION

(57)摘要

本發明係關於一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源。該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備進一步包含：一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及一射束分裂器，其經配置以沿一第一路徑將該電子束之一第一部分引導朝向該目標之一第一側且沿一第二路徑將該電子束之一第二部分引導朝向該目標之一第二側。

A radioisotope production apparatus comprising an electron source arranged to provide an electron beam. The electron source comprises an electron injector and an electron accelerator. The radioisotope production apparatus further comprises a target support structure configured to hold a target and a beam splitter arranged to direct a first portion of the electron beam along a first path towards a first side of the target and to direct a second portion of the electron beam along a second path towards a second side of the target.

指定代表圖：



【圖1】

符號簡單說明：

10 . . . 電子注入器

20 . . . 電子加速器/
線性加速器

30 . . . 目標

40 . . . 電子束分裂
器

E . . . 電子束

RI . . . 放射性同位
素生產設備

【發明說明書】

【中文發明名稱】

放射性同位素生產

【英文發明名稱】

RADIOISOTOPE PRODUCTION

【技術領域】

本發明係關於放射性同位素生產設備及相關聯方法。本發明可用於包含自由電子雷射及放射性同位素生產設備之系統中。

【先前技術】

放射性同位素為不穩定之同位素。放射性同位素將藉由發射質子及/或中子而在一段時間之後衰變。放射性同位素用於醫療診斷及用於醫學治療，且亦用於工業應用中。

最常用的醫用放射性同位素為Tc-99m (鎝)，其用於診斷應用中。Tc-99m之產生使用高通量核反應器。包含U-238與U-235之混合物的高濃縮鈾在核反應器中由中子轟擊。此致使U-235中的一些經受裂變且分離為Mo-99+Sn(x13)+中子。Mo-99自其他裂變產物分離出且運送至放射性藥房。Mo-99具有66小時之半衰期且衰變至Tc-99m。Tc-99m具有僅6小時之半衰期(其適用於醫療診斷技術)。在放射性藥房處Tc-99m與Mo-99分離且隨後用於醫療診斷技術。

Mo-99廣泛地在全球使用以產生用於醫療診斷技術之Tc-99m。然而，僅存在可用以產生Mo-99之少數高通量核反應器。其他放射性同位素亦使用此等高通量核反應器製成。所有高通量核反應器都使用了超過40年，且無法預期它們繼續無限地操作。

可認為需要提供替代放射性同位素生產設備及相關聯方法及/或相關聯系統。

【發明內容】

根據本文中所描述之一態樣，提供一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備進一步包含：一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及一射束分裂器。該射束分裂器經配置以沿一第一路徑將該電子束之一第一部分引導朝向該目標之一第一側且沿一第二路徑將該電子束之一第二部分引導朝向該目標之一第二側。

以此方式，由電子束產生之熱更好地分佈在整個目標上。

該電子束可包含複數個脈衝，且該射束分裂器可經配置以實質上沿該第一路徑引導該等脈衝之一半且沿該第二路徑引導該等脈衝之一半。以此方式，目標之每一側將遇到電子束之脈衝的實質上一半。該射束分裂器可包含一偏轉器。

該目標可包含一電子目標及一光子目標。該電子目標可經配置以接收該電子束之該第一部分及該第二部分中的至少一者且朝向該光子目標發射光子。

該電子目標可包含經配置以接收該電子束之該第一部分的一第一部分及經配置以接收該電子束之該第二部分的一第二部分。該電子目標之該第一部分及該第二部分可安置於該光子目標之任一側。

該放射性同位素生產設備可進一步包含一冷卻設備，該冷卻設備經配置以將一流體冷卻劑提供至該目標。該冷卻設備可經配置以將一液體冷卻劑提供至該電子目標且將一氣體冷卻劑提供至該光子目標。可在高於該液

體冷卻劑之一壓力下提供該氣體冷卻劑。

根據本文中所描述之第二態樣，提供一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備進一步包含：一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及一第一電子束分佈設備及一第二電子束分佈設備，其一同經配置以在該目標之一表面上方掃描該電子束。

該第一射束分佈設備可為經配置以朝向該第二電子束分佈設備將該電子束掃掠通過一預定角度之一第一偏轉器。

該第二射束分佈設備可為經配置以偏轉該經掃掠電子束以使得其實質上遠心地衝擊於該目標上之一第二偏轉器。該第二分佈設備可替代地為經配置以使該電子束準直之一透鏡。

該放射性同位素生產設備可進一步包含一射束分裂器，該射束分裂器經配置以沿一第一路徑將該電子束之一第一部分引導朝向該目標之一第一側且沿一第二路徑將該電子束之一第二部分引導朝向該目標之一第二側。

該第一射束分佈設備及該第二射束分佈設備可沿該第一路徑安置。

該放射性同位素生產設備可進一步包含第三射束分佈設備及第四射束分佈設備，該第三射束分佈設備與該第四射束分佈設備一同經配置以在該目標之另一表面上方掃描該電子束，該第三射束分佈設備及該第四射束分佈設備係沿該第二路徑安置。

該目標可包含一電子目標及一光子目標。該電子目標可經配置以自該第二電子束分佈設備接收該電子束且朝向該光子目標發射光子。該電子目標可包含經配置以自該第一分佈設備及該第二分佈設備接收該電子束之該第一部分之一第一部分及經配置以自該第三分佈設備及該第四分佈設備接

收該電子束之該第二部分的一第二部分。

根據本文中所描述之第三態樣，提供一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備可進一步包含：一電子目標支撐結構，其經組態以固持一電子目標以接收該電子束以便產生光子；及一光子目標支撐結構，其經組態以固持一光子目標以用於接收該等光子中之至少一些。

該放射性同位素生產設備可經組態以誘發該電子目標與該電子束之間的相對移動。

該放射性同位素生產設備可進一步包含一電子束分佈設備，該電子束分佈設備經配置以相對於該電子目標移動該電子束。

該電子束分佈設備可包含一或多個射束偏轉器。一射束偏轉器可經組態以在該電子目標之該表面上方掃描該電子束。

該電子束分佈設備可包含一透鏡。一透鏡可經組態以使該電子束準直。

該電子目標支撐結構可經組態以相對於該電子束移動該電子目標。舉例而言，該電子目標支撐結構可經組態以旋轉該電子目標。

該電子目標可為液體，且該電子目標支撐結構可經組態以致使該電子目標流動通過一電子束目標區。

該放射性同位素生產設備可進一步包含一冷卻設備，該冷卻設備經配置以將一流體冷卻劑提供至該目標。該冷卻設備可經配置以將一液體冷卻劑提供至該目標之一電子目標部分且將一氣體冷卻劑提供至該目標之一光子目標部分。該冷卻設備可經配置以在高於該液體冷卻劑之一壓力下提供

該氣體冷卻劑。

該冷卻設備可經配置以在大致70巴之一壓力下將一氦冷卻劑提供至該光子目標且在大致1巴之一壓力下將一水冷卻劑提供至該電子目標。

根據本文中所描述之第四態樣，提供一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備進一步包含：一腔室，其容納經組態以將一目標固持於該電子束之一路徑中的一目標支撐結構；及一窗，該電子束通過其進入該腔室。該窗可包含碳化矽。

以此方式，該設備提供允許透射電子束及/或光子、熱穩定且能夠承受電子束之環境與腔室之間的壓力差之窗。

該窗可為穹狀的。該窗可具有在85 mm與4000 mm之間的一曲率。

該窗可藉由化學氣相沈積製造，且該腔室可為經密閉性密封之腔室。

根據本文中所描述之第五態樣，提供一種產生具有在一所要範圍內之一比活性的一放射性同位素之方法。該方法包含使用放射性同位素生產設備來產生一放射性同位素。該放射性同位素生產設備包含：一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；及一目標支撐結構，其經組態以固持一目標。該方法進一步包含實體地(例如，機械地)分離具有在該所要範圍內之一比活性的該放射性同位素之至少一部分。

該方法可進一步包含曝露在將該目標曝露於該電子束以產生該放射性同位素之前對該目標穿孔。

該放射性同位素生產設備可為根據上文所描述之第一至第四態樣中之任一者的一放射性同位素生產設備。

根據本文中所描述之第六態樣，提供一種系統，其包含：根據第一至第四態樣中之任一者的一放射性同位素生產設備；及一自由電子雷射，其包含一能量恢復電子加速器及一波盪器。該放射性同位素生產設備之該電子加速器經定位以在一電子束已由該能量恢復電子加速器加速接著減速之後接收該電子束，該放射性同位素生產設備之該電子加速器經組態以將該電子束之電子加速至大約14 MeV或更大之一能量，以用於後續遞送至該放射性同位素生產設備之該電子目標。

根據本文中所描述之第七態樣，提供一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標。該目標包含複數個間隔開之部分。該目標經組態以在該目標經受一電子束時擴展，使得防止該複數個部分之間的接觸。

該目標可經組態以擴展，使得可維持該複數個部分之鄰近部分之間的一間隙或間隔。

該目標可包含複數個接觸點，在該複數個接觸點處，該複數個部分之鄰近部分相接觸。該目標可包含複數個開口，該複數個開口經配置以在該複數個接觸點中之至少兩個接觸點之間延伸。

該目標可包含一可撓性或可變形目標。

該目標可包含一格型結構或一蜂巢結構。

該複數個部分可包含複數個目標元件。該複數個目標元件可經配置以形成該目標。每一目標元件可包含複數個凹槽或通孔。

該複數個部分可相對於彼此同心地配置。

該複數個部分可經配置以形成一螺旋狀或螺旋形結構。

根據本文中所描述之第八態樣，提供一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標。該目標經組態以在該目標經受一電子束時擴展，使

得允許或維持一冷卻劑流動通過該目標。

該目標可包含一多孔結構或材料。舉例而言，該多孔結構或材料可包含一發泡體或燒結材料。

根據本文中所描述之第九態樣，提供一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標配置，其包含一目標及一目標支撐結構。該目標支撐結構經組態以相對於一電子束移動或旋轉該目標。

該目標可為或包含根據第七及/或第八態樣之一目標。

該目標支撐結構可經組態以繞該目標之一橫向軸線或一縱向軸線移動或旋轉該目標。

該目標配置可包含一外殼。該目標配置可包含用於將該電子束透射至該外殼中之一窗。

該目標支撐結構可配置於或配置於該外殼中以相對於該外殼及該窗移動或旋轉該目標。

該窗可經配置以圍繞該目標。該目標支撐結構可經組態以將該外殼及窗與該目標一起移動或旋轉。

根據本文中所描述之第十態樣，提供一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備包含：一目標配置，其用於相對於該電子束配置一目標；及一電子束聚焦配置，其經組態以將該電子束聚焦於該目標上。

該目標配置可包含根據第九態樣之一目標配置。

根據本文中所描述之第十一態樣，提供一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標配置，其包含一目標。該目標包含複數個間隔開之

目標元件。該目標配置包含一目標支撐結構，該目標支撐結構經組態以懸置該複數個目標元件之一部分以允許目標元件之該部分在至少一個方向上擴展。

該複數個目標元件可經配置以在該目標之至少一個方向上交錯。該複數個目標元件可經配置以成直線或在該目標之至少一個其他方向上對準。

該目標支撐結構可包含複數個支撐元件。每一支撐元件可經組態以懸置該複數個目標元件之一部分。

該目標支撐結構可包含用於懸置該複數個目標元件之該部分的一第一部分。該目標支撐結構可包含用於支撐該複數個目標元件之另一部分之一自由端的一第二部分。

可選擇該複數個目標元件之鄰近目標元件之間的一間隔以允許在至少一個其他方向上擴張或擴展該等目標元件。

根據本文中所描述之第十二態樣，提供一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標。該目標包含一第一材料。該第一材料包含用於轉換成一放射性同位素之一基板材料。該目標包含一第二材料。該第二材料可經組態以保留經轉換基板材料。該第二材料可被配置或可配置於該第一材料中或與該第一材料一起配置以形成該目標。

該基板材料可包含鐳-158 (Dy-158)、鐳-226 (Ra-226)、釷(Th-228)及鎳-64 (Ni-64)中之至少一者。

該第二材料可包含複數個粒子。每一粒子可具有約10 nm之一大小或直徑。

該第二材料可包含石墨烯、碳及金屬中之至少一者。

該第二材料可懸置或分散於一物質或流體中，例如液體。該第二材料

可包含一膠體或膠體溶液。

根據本文中所描述之第十三態樣，提供一種產生一放射性同位素之方法。該方法包含將一目標配置於一放射性同位素生產設備中。該目標包含一第一材料。該第一材料包含用於轉換成一放射性同位素之一基板材料。該目標包含一第二材料。該第二材料經組態以保留經轉換基板材料。該第二材料被配置或可配置於該第一材料中或與該第一材料一起配置以形成該目標。該方法包含藉由一電子束輻照該目標。該電子束經組態以致使該基板材料之一部分轉換成該放射性同位素。該電子束經組態以致使該經轉換基板材料中之一些位移至該第二材料中。該方法包含將該經轉換基板材料與該第二材料分離。

分離之步驟可包含在將該經轉換基板材料與該第二材料分離之前將該第二材料與該第一材料分離。

根據本文中所描述之第十四態樣，提供一種放射性同位素生產設備，其包含用以提供一電子束之一電子源，該電子源包含一注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備包含一腔室，該腔室容納經組態以將一目標固持於該電子束之一路徑中的一目標支撐結構。該放射性同位素生產設備包含用於將該腔室與該電子源分離之一分離元件。該分離元件包含一孔隙，該電子束通過該孔隙進入該腔室。

該放射性同位素生產設備可包含配置於該分離元件與該目標支撐結構之間的一屏蔽元件。該屏蔽元件可包含一孔隙，該電子束通過該孔隙傳遞至該目標。

該屏蔽元件之該孔隙可大於該分離元件之該孔隙。

該放射性同位素生產設備可包含另一分離元件。該另一分離元件可包

含另一孔隙，該射束通過該孔隙朝向該目標傳遞。

該另一分離元件之該另一孔隙可具有與該分離元件之該孔隙相同之大小或具有與該分離元件之該孔隙不同之大小。

該放射性同位素生產設備可包含一冷卻設備。該冷卻設備可經配置以將一冷卻劑提供至該目標。

該分離元件及/或另一分離元件配置於該腔室中，使得允許冷卻劑通過該孔隙及/或另一孔隙朝向該電子源流動。

本發明之任何給定態樣之特徵可與本發明之其他態樣之特徵組合。

如將對熟習此項技術者易於顯而易見，可將上文或下文所闡述之本發明之各種態樣及特徵與本發明之各種其他態樣及特徵組合。

【圖式簡單說明】

現將參看隨附示意性圖式而僅藉助於實例來描述本發明之實施例，在該等圖式中：

- 圖1為放射性同位素生產設備之示意性說明；
- 圖2a為放射性同位素生產設備內之目標的示意性說明；
- 圖2b為放射性同位素生產設備之包含分開的電子及光子目標的目標之示意性說明；
- 圖3a為自兩側接收輻射之目標的示意性說明；
- 圖3b為包括自兩側接收輻射之分開的電子及光子目標的目標之示意性說明；
- 圖4為包含射束分佈設備之放射性同位素生產設備的示意性說明；
- 圖5、圖6a、圖6b及圖7為放射性同位素生產設備之動態電子目標配置的示意性說明；

- 圖8為利用液體電子目標之放射性同位素生產設備之電子目標配置的示意性說明；

- 圖9為根據所描述配置產生之放射性同位素的示意性說明；

- 圖10為包含自由電子雷射及根據本發明之一實施例之放射性同位素生產設備的系統之部分的示意性說明；

圖11a至圖11h為放射性同位素生產設備之目標的示意性說明；

圖12a及圖12b為放射性同位素生產設備之目標配置的示意性說明；

圖13a為包含外殼及窗之放射性同位素生產設備之目標配置的示意性說明；

圖13b為包含可移動目標之放射性同位素生產設備之目標配置的示意性說明；

圖13c為包含可移動外殼、窗及目標之放射性同位素生產設備之目標配置的示意性說明；

圖14a及圖14b為包含電子束聚焦配置之放射性同位素生產設備之電子目標配置的示意性說明；

圖15a至圖15c為放射性同位素生產設備之目標的示意性說明；

圖16a至圖16e為用於產生放射性同位素之方法之製程步驟的示意性說明；

圖17a為說明植入至第二材料中之經轉換基板材料的圖；

圖17b為說明第二材料中之經轉換材料之分佈的圖；

圖17c為說明同位素分佈之核素圖；

圖18為包含分離元件之目標配置的示意性說明，該分離元件包含孔隙；

圖19為包含屏蔽元件之目標配置的示意性說明，該屏蔽元件包含孔隙；

圖20a至圖20c為圖18b之目標配置之部分中之冷卻劑流供應及提取的示意性說明；且

圖21為包含另一分離元件之目標配置的示意性說明，該另一分離元件包含另一孔隙。

一般而言在本文中，諸圖內之相同參考數字指相同或等效特徵。

【實施方式】

圖1示意性地描繪放射性同位素生產設備。放射性同位素生產設備RI包含電子注入器10及呈線性加速器形式之電子加速器20。電子注入器10經配置以產生聚束式電子束，且包含電子源(例如，由脈衝式雷射光束照明之光電陰極或熱離子發射源)及提供加速電場之增幅器。由增幅器提供之加速電場可(例如)將電子束之電子加速至大約10 MeV之能量。

電子束E中之電子可由磁體(未圖示)轉向至線性加速器20。線性加速器20加速電子束E。在一實例中，線性加速器20可包含：複數個射頻空腔，其軸向地間隔開；及一或多個射頻電源，其可操作以在電子聚束在電磁場之間傳遞時沿共同軸線控制該等電磁場以便加速每一電子聚束。空腔可為超導射頻空腔。有利的是，此允許：以高工作循環施加相對較大電磁場；較大光束孔徑，從而引起較少的歸因於尾場(wakefield)之損耗；且允許增加傳輸至光束(相反於通過空腔壁而耗散)之射頻能量的分率。替代地，空腔習知地可導電(亦即，不超導)，且可自(例如)銅形成。可使用其他類型之線性加速器，諸如，雷射尾場加速器或反自由電子雷射加速器。

儘管線性加速器20在圖1中被描繪為沿單一軸線配置，但線性加速器

可包含不位於單一軸線上之模組。舉例而言，可在一些線性加速器模組與其他線性加速器模組之間存在彎曲。

線性加速器20可(例如)將電子加速至大約14 MeV或更大之能量。線性加速器可將電子加速至大約30 MeV或更大(例如，多達大約45 MeV)之能量。不將電子加速至大於預定所要量(例如，60 MeV)之能量可為有益的，此係因為在某些能量處可產生大量除了所要放射性同位素以外的非吾人所樂見之產物。在一實施例中，線性加速器130a可將電子加速至大約35 MeV之能量。

放射性同位素生產設備RI進一步包含目標30，目標30經組態以接收電子且使用電子將源材料轉換成放射性同位素。目標30可為Mo-100 (Mo-100為Mo之穩定且天然產生的同位素)，其將經由光子誘發之中子發射而轉換成Mo-99。產生光子之機制為由於電子撞擊目標30而產生之Bremsstrahlung輻射(英文：制動輻射(braking radiation))。以此方式產生之光子之能量可(例如)大於100 keV，可大於1 MeV，且可大於10 MeV。光子可描述為極硬的X射線。

此反應具有8.29 MeV之臨限能量，且因此在入射於光子目標上之光子具有少於8.29 MeV之能量的情況下將不發生。反應具有橫截面，該橫截面在大約14 MeV處達到峰值(反應橫截面指示由具有給定能量之光子誘發反應的機率)。換言之，反應在大約14 MeV處具有諧振峰值。因此，在一實施例中，可使用具有大約14 MeV或更大之能量之光子將Mo-100光子目標轉換成Mo-99。

所產生之光子之能量具有上限，該上限由電子束E中之電子的能量設定。光子將具有能量分佈，但彼分佈之上限將不延伸超出電子束中之電子

的能量。因此，在用於將Mo-100光子目標轉換成Mo-99之一實施例中，電子束將具有至少8.29 MeV之能量。在一實施例中，電子束E可具有大約14 MeV或更大之能量。

當電子束之能量增加時，將產生具有足以引起所要反應之能量的更多光子(對於相同的電子電流)。舉例而言，如上文所提及，Mo-99產生具有在大約14 MeV處達到峰值之橫截面。若電子束E具有大約28 MeV之能量，則每一電子可產生具有大約14 MeV之能量的兩個光子，藉此增加光子目標至Mo-99之轉換。然而，當電子束之能量增加時，具有較高能量之光子將誘發其他非吾人所樂見之反應。舉例而言，經光子誘發之中子及質子發射具有18 MeV之臨限能量。此反應為非所要的，此係因為其不產生Mo-99，而是產生非吾人所樂見之反應產物。

一般而言，電子束之能量(及因此光子之最大能量)之選擇可基於想要的產物(例如，Mo-99)之產率與非吾人所樂見之產物之產率之間的比較。在一實施例中，電子束可具有大約14 MeV或更大之能量。電子束E可(例如)具有大約30 MeV或更大(例如，多達大約45 MeV)之能量。此電子束能量範圍可在14 MeV之反應諧振峰值附近之能量下提供光子之良好生產率。然而，在其他實施例中，電子束可具有其他能量。舉例而言，電子束可具有60 MeV之能量，因為在此能量下之電子可能夠引起多個反應且藉此增加產率。

圖2a示意性地描繪目標30之實例配置。在圖2a中，目標30包含Mo-100之複數個板32，板32由支撐件31支撐。如上文所描述，當電子束E中之電子入射於板32上時，發射光子。由圖2a中之波浪線 γ 示意性地描繪自目標30發射之光子。當光子 γ 入射於Mo-100原子核上時，其引起光致核反

應，由此自原子核射出中子。Mo-100原子由此轉換為Mo-99原子。在圖2a之配置中，板32可被視為電子目標及光子目標兩者。

目標30可在一段時間內接收光子 γ ，在此期間目標30中之Mo-99之比例增加且目標中之Mo-100之比例減少。目標30隨後被自放射性同位素生產設備RI移除以用於處理並輸送至放射性藥房。作為Mo-99之衰變產物的Tc-99經提取且用於醫療診斷應用中。

圖2b示意性地描繪目標30之替代實例配置。在圖2b中，目標30進一步包含單獨電子目標34。在提供單獨電子目標之情況下，目標板32可被視為光子目標。電子目標34可(例如)自鎢、鉭或將使電子減速且產生光子之一些其他材料形成。然而，電子目標34可自與光子目標(例如，Mo-100)相同之材料形成。電子目標由支撐結構33固持。

儘管圖2中所展示之目標32包含三個板，但該目標可包含任何適合數目個板。儘管所描述之目標包含Mo-100，但光子目標可包含任何合適材料。類似地，目標之材料可以任何合適形狀及/或組態提供。可環繞目標30提供屏蔽件(例如，鉛屏蔽件)。

儘管圖2b之電子目標34被描繪為材料之單一區塊，但其可作為複數個板提供。板可(例如)具有對應於上文所描述之目標板32之建構的建構。類似地，支撐結構33可經組態以固持複數個電子目標板。

電子目標34及目標板32可提供於冷卻劑流體流動通過之管道中，如下文進一步所描述。

再次參看圖1，放射性同位素生產設備RI進一步包含電子束分裂器40。電子束分裂器經配置以沿兩個傳播路徑分裂電子束E：朝向目標30之一側的第一傳播路徑及朝向目標30之相反側的第二傳播路徑。可提供磁體

(未圖示)以沿傳播路徑中之每一者將電子束E轉向。如熟習此項技術者將理解，電子束E為所謂的脈衝串。電子束分裂器40經配置以沿第一路徑引導脈衝之一部分且沿第二路徑引導脈衝之一部分。舉例而言，可沿第一路徑發送電子束E中之脈衝之50%，且沿第二路徑發送該等脈衝之50%。然而，將瞭解，可使用(兩個傳播路徑之間的)任何比率之脈衝。

電子束分裂器40可使用任何適當構件來實施，且可為(例如)利用磁性或靜電偏轉之偏轉器(例如，投擲器(kicker))。可在足夠高以使得熱負荷實質上均勻分佈於目標30之每一側上的頻率下完成分裂。在一些實施例中，可在電子束E內跳過脈衝以允許用於在脈衝之間切換之時間。藉助於實例，若在650 MHz下產生脈衝，則可每10毫秒跳過1000個脈衝，從而留下大致1.5微秒供射束分裂器40切換電子束E之傳播路徑。

圖3a示意性地說明在目標30之每一側處接收的電子束E。圖3b示意性地說明提供分開的電子目標之目標30之配置。在圖3b中，目標30包含兩個電子目標34a、34b，電子目標34a、34b安置於目標板32之各別側處且由各別支撐結構33a、33b支撐。每一電子目標34a、34b經配置以接收電子束E之一部分且朝向目標板32之任一側發射光子。

藉由跨越目標30更均勻地分佈磁頭負荷(headload)，在目標處產生之總溫度應較低，藉此放鬆並簡化冷卻要求。

圖4示意性地說明放射性同位素生產設備RI之替代配置。在圖4中，提供複數個電子束分佈設備以將電子束E分佈於目標30之面上方。一般而言，可以偏轉器及/或磁體(諸如四極)中之任一者或其組合形式提供電子束分佈設備。

在圖4之所描繪實例實施例中，可以安置於電子束E之路徑中且經組

態以將電子束E掃掠通過一角度的偏轉器50之形式提供第一電子束分佈設備。在圖4之特定實例中，偏轉器50經組態以在第二電子束分佈設備之表面上方掃掠電子束E。此可藉由將連續變化電壓施加至偏轉器50之板來達成。第二電子束分佈設備可呈經配置以偏轉電子束E以使得其實質上遠心地衝擊於目標30之表面上的第二偏轉器60之形式。在其他實施例中，第二電子分佈設備60可呈用於準直電子束E之透鏡的形式。電子束E之準直係有用的，此係因為發散電子束將增加所產生之光子的發散度。此又將需要較大目標以便收集光子，此將減少在目標處產生之Mo-99 (或其他放射性同位素)的比活性。透鏡可(例如)自磁體形成，且可為多極(例如，四極、六極、八極)透鏡。

總之，第一分佈設備及第二分佈設備致使電子束E跨越目標30之較大區域分佈，藉此分佈熱負荷且因此減少冷卻要求。另外，在透鏡用作第二電子束分佈設備60之情況下，可動態地調整透鏡之強度以獲得電子束E之所要焦點。藉由進一步向下游移動焦點，有可能增加所產生之光子的量，但代價為目標30之經輻照部分上之熱負荷較高。

將瞭解，可使用分佈設備之其他配置。舉例而言，在其他實施例中，可以經配置以散焦電子束E且因此將電子束E放大至第二分佈設備60處之所要尺寸的透鏡之形式提供第一分佈設備。一般而言，可使用靜態電子束分佈設備(例如，透鏡)及動態電子束分佈設備(例如，偏轉器)之任何組合。

圖5示意性地說明目標配置70，目標配置70可與放射性同位素生產設備一起使用。目標70包含由支撐結構(未圖示)固持之電子目標71及由支撐結構(未圖示)固持之光子目標72。電子目標71經由光子輻射可傳遞通過之

窗73與光子目標72分離。目標71、72安裝於外殼74內。外殼74包含窗75，電子束通過窗75引導朝向如上文所描述之電子目標71。

外殼74與窗73一同界定彼此隔離之兩個腔室：容納電子目標71之第一腔室76及容納光子目標72之第二腔室77。藉由隔離腔室76、77中之每一者，可分別冷卻電子目標71及光子目標72中之每一者。以此方式，電子目標71可經受比施加至光子目標72之冷卻更有效的冷卻。舉例而言，在光子目標72為Mo-100之情況下，歸因於Mo-100可溶於液體冷卻劑中，此可防止液體冷卻。然而，如上文所描述，電子目標71可由不同材料製成，諸如將不可溶於液體冷卻劑之鎢或鉭。由此，可能需要藉由液體冷卻劑冷卻電子目標而藉由氣體冷卻劑冷卻光子目標。在所描繪之實例中，藉由水76a之流動冷卻腔室76，而藉由氦(He) 77a之流動冷卻光子目標72。在一些實施例中，用於冷卻光子目標72及電子目標71之冷卻劑可在不同壓力下。舉例而言，因為與流水之冷卻性質相比，流動He之冷卻性質相對較差，所以供應至光子目標之冷卻劑可在較高壓力下供應。藉助於實例，在圖5之目標配置70中，可在1巴(100 kPa)之壓力下供應水冷卻劑76a，而可在70巴(7000 kPa)之壓力下供應氦冷卻劑77a。

窗73、75中之任一者或兩者可自(例如)薄碳化矽層或其他合適材料建構。將瞭解，該等窗應允許透射電子束E及/或光子、熱穩定且能夠承受電子束之環境(可為真空)之間的壓力差及第一腔室76與第二腔室77之間的壓力差。

如上文所指示，在一些實施例中，提供窗以將光子目標與產生電子束之真空(例如，在不提供單獨電子目標之情況下)或電子目標(例如，在提供單獨電子目標之情況下)分離。在一些實施例中，將光子目標與其他區

域分離之窗可為穹狀的，以便更好地承受容納光子目標之腔室與鄰近區域之間的壓力差。舉例而言，參看圖5，窗73可為穹狀的，以更好地承受腔室76、77之間的69巴壓力差，同時仍足夠薄(如在電子束E之傳播方向上所量測)以允許足量的光子傳遞通過窗73以衝擊光子目標72。

類似地，在光子目標鄰近電子束E傳播通過之真空的情況下，可存在(例如)70巴之壓力差(在如上文所描述(例如)在70巴之壓力下提供氫氣冷卻的情況下)。由此，將光子目標與真空分離之窗可為穹狀的。此類穹狀窗可(例如)使用SiC之化學氣相沈積(CVD)來製造。為了確保對作用於窗之力的適應性，窗可具有在85 mm與4000 mm之間的曲率。此類CVD-SiC穹狀窗將適合於密閉性密封、能夠承受高溫、傳導電流及應對目標之不同區域之間的壓力差。

圖6a、圖6b示意性地描繪根據本文中所描述之一實施例之動態電子目標配置80。圖6a描繪配置80 (在平行於電子束E之傳播方向的平面中)之側視圖，而圖6b描繪在垂直於電子束E之傳播方向的平面中之配置80。配置80包含電子目標81，電子目標81雖然在圖6a、圖6b中描繪為複數個圓形板，但可呈如上文所描述之任何適當形式。舉例而言，電子目標81可包含複數個任何形狀之板，諸如矩形板。

電子目標81經組態以繞被描繪為在電子目標81之中心點處的軸線A-A旋轉。舉例而言，電子目標81可安裝於界定軸線A-A之軸上，且可提供合適的致動器以旋轉該軸且藉此旋轉電子目標81。然而，將瞭解，可致使電子目標81以任何適合方式繞軸線A-A旋轉。另外，應理解，軸線A-A無需居中安置於電子目標81內。

在使用期間，電子目標81繞軸線A-A旋轉，使得目標81之不同部分在

曝露期間的不同時間曝露於電子束E。以此方式，賦予至電子目標81之熱更均勻地分佈於電子目標81之表面上方，藉此減少冷卻。在其他實施例中，電子束E可在目標81之表面上方移動而無需旋轉81。

圖7描繪電子目標91包含圓柱地環繞軸線B-B配置之複數個矩形板的替代動態電子目標配置90。如在配置80中，電子目標91經組態以繞軸線B-B旋轉，以便將形成電子目標91之板中之不同者(或在電子目標91不包含複數個板之情況下僅電子目標91之不同部分)曝露於電子束E。管92圍繞電子目標91且提供管道以供冷卻劑(例如，水)被發送通過電子目標91。

圖8示意性地描繪替代動態電子目標配置100，其中以電子束E被引導通過之液體「簾」之形式提供電子目標。在圖8中，電子目標儲集器101a經由供應管102連接至電子目標截留器101b。電子目標儲集器101a (例如，經由泵之作用)將呈液體形式之電子目標103供應至供應管102，電子目標103經由供應管102流動至電子目標截留器101b。電子束E被引導朝向流動通過供應管102之電子目標103。電子目標103可為(例如) PbBi或Hg。電子目標可經由再循環管(未圖示)自電子目標截留器101b再循環至電子目標儲集器101a且可在再循環期間冷卻。藉由提供呈液體形式之流動電子目標103，增加電子目標之有效表面積，藉此改良由電子束E賦予至電子目標103之熱負荷的分佈。另外，電子目標103之流動使得熱自電子束E附近自動移除。

在替代配置中，鉛鉍共晶(LBE)可被用作電子目標及冷卻劑液體兩者。LBE提供其具有高於其他冷卻劑液體(例如，水)之沸點的優點。其他合適液體可被用作電子目標及冷卻劑液體兩者。

在一實施例中，在電子目標103與配置100內之其他表面之間提供軸

承。舉例而言，可在液體電子目標103與配置100之其他表面之間以水簾形式提供軸承。

圖9示意性地說明呈(例如) Mo-100之正方形板形式的光子目標110。光子目標110可為(例如)經組合光子及電子目標，或單獨光子目標，如上文所論述。在圖9之描述中，已處理光子目標110以產生穿孔111以界定光子目標110之中心部分112及外部部分113。一般而言，光子目標之比活性將徑向地變化，其中中心部分具有高於外部部分之比活性。另外，一些應用需要或偏好具有特定比活性之放射性同位素。由此，藉由將光子目標110分成複數個部分，可針對不同應用將不同區提供至不同方。光子目標110中之穿孔111允許方便地分離徑向部分112、113，但將自上文認識到，此類穿孔並非實施例之基本特徵。可使用在曝露於電子束E之前或之後用以分離光子目標之部分的其他方法，諸如，加壓、切割等，如熟習此項技術者將顯而易見。

圖10示意性地展示包含自由電子雷射FEL及放射性同位素生產設備RI_{a-c}之系統的一實例。自由電子雷射FEL能夠產生EUV輻射光束B_{FEL}，EUV輻射光束B_{FEL}足夠強，可為複數個微影設備LA_{1-n}供應可用於將圖案投影至基板上之EUV輻射光束。

自由電子雷射FEL包含兩個電子注入器121a、121b、線性加速器122、波盪器124及光束集堆150。自由電子雷射亦可包含聚束壓縮器(未說明)。圖10中之系統可在不同操作模式之間切換，其中電子束E遵循不同路徑。在所說明模式中，由實線描繪電子束E，由虛線描繪替代電子束路徑。

在所描繪操作模式中，第二電子注入器21b提供電子束E，電子束E由

自由電子雷射使用以產生EUV輻射光束 B_{FEL} 。第一電子注入器21a提供用於如上文所描述產生放射性同位素的電子束 E_I 。

在由線性加速器122加速之後，電子束E由磁體(未圖示)轉向至波盪器24。視情況，電子束E可傳遞通過聚束壓縮器(未圖示)，其安置於線性加速器122與波盪器24之間。聚束壓縮器可經組態以在空間上壓縮電子束E中之現有電子聚束。

電子束E接著傳遞通過波盪器24。一般而言，波盪器24包含複數個模組。每一模組包含週期性磁體結構，該週期性磁體結構可操作以產生週期性磁場且經配置以便沿彼模組內之週期性路徑引導由電子注入器121a、121b及線性加速器122產生的電子束E。由每一波盪器模組產生之週期性磁場致使電子遵循圍繞中心軸線之振盪路徑。因此，在每一波盪器模組內，電子一般在彼波盪器模組之中心軸線的方向上輻射電磁輻射。經輻射電磁輻射形成EUV輻射光束 B_{FEL} ，EUV輻射光束 B_{FEL} 傳遞至微影設備 LA_{1-n} 且由彼等微影設備使用以將圖案投影至基板上。

由電子遵循之路徑可為正弦且平面的，其中電子週期性地橫穿中心軸線。替代地，路徑可為螺旋狀的，其中電子圍繞中心軸線旋轉。振盪路徑之類型可影響由自由電子雷射發射之輻射的偏振。舉例而言，致使電子沿螺旋狀路徑傳播之自由電子雷射可發射橢圓偏振輻射，此對於由一些微影設備進行基板W之曝光可為合乎需要的。

在電子移動通過每一波盪器模組時，其與輻射之電場相互作用，從而與輻射交換能量。一般而言，除非條件接近於諧振條件，否則在電子與輻射之間交換之能量的量將快速振盪。在諧振條件下，電子與輻射之間的相互作用致使電子一起聚束成在波盪器內之輻射的波長下調變的微聚束，且

刺激沿中心軸線之相干輻射發射。諧振條件可由下式給出：

$$\lambda_{em} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{A} \right), \quad (1)$$

其中 λ_{em} 為輻射之波長， λ_u 為電子傳播通過之波盪器模組的波盪器週期， γ 為電子之勞倫茲因數，且 K 為波盪器參數。 A 取決於波盪器24之幾何形狀：對於產生圓偏振輻射之螺旋波盪器， $A=1$ ；對於平面波盪器， $A=2$ ；且對於產生橢圓偏振輻射(亦即，既非圓偏振，亦非線性偏振)之螺旋波盪器， $1 < A < 2$ 。實務上，每一電子聚束將具有一能量展度，但可儘可能地最小化此展度(藉由產生具有低發射率之電子束E)。波盪器參數 K 通常為大致1且由下式給出：

$$K = \frac{q\lambda_u B_0}{2\pi mc}, \quad (2)$$

其中 q 及 m 分別為電荷及電子質量， B_0 為週期性磁場之振幅，且 c 為光速。

諧振波長 λ_{em} 等於由移動通過每一波盪器模組之電子自發地輻射的第一諧波波長。自由電子雷射FEL可在自放大自發發射(SASE)模式中操作。在SASE模式中之操作可需要在電子束E進入每一波盪器模組之前電子束E中之電子聚束具有低能量展度。替代地，自由電子雷射FEL可包含可藉由波盪器24內之經刺激發射放大的種子輻射源。自由電子雷射FEL可作為再循環放大器自由電子雷射(RAFEL)操作，其中由自由電子雷射FEL產生之輻射的一部分用於輻射之進一步產生的種子。

脫離波盪器124之電子束E由磁體(未圖示)轉向回至線性加速器122中。電子束E相對於由電子注入器121a、121b產生之電子束以180度之相位差進入線性加速器122。線性加速器中之RF場因此用以使自波盪器24輸出之電子減速且使自電子注入器121a、121b輸出之電子加速。當電子在

線性加速器122中減速時，電子之能量中之一些被轉移至線性加速器122中之RF場。來自減速電子之能量因此由線性加速器122恢復且用於使自電子注入器121輸出之電子束E加速。此配置被稱為能量恢復線性加速器(ERL)。

在由線性加速器122減速後，電子束 E_R 由光束集堆150吸收。光束集堆150可包含足夠量之材料以吸收電子束 E_R 。該材料可具有用於放射性之誘發的臨限能量。進入光束集堆150之具有低於臨限能量之能量的電子可僅產生 γ 射線簇射，但將不誘發任何顯著位準的放射性。材料可具有高臨限能量以用於藉由電子衝擊誘發放射性。舉例而言，光束集堆150可包含鋁(Al)，其具有大約17 MeV之臨限能量。電子束E之電子能量在離開線性加速器122之後可小於17 MeV (其可為(例如)大約10 MeV)，且因此可低於光束集堆150之臨限能量。此移除或至少減少自光束集堆150移除及處置放射性廢料之需要。

除了包含自由電子雷射FEL及微影設備 LA_{1-n} 之外，圖1中所描繪之系統進一步包含放射性同位素生產設備 RI_{a-c} 。描繪三個放射性同位素生產設備 RI_{a-c} ，該等設備中之每一者具有相同的一般組態。詳言之，每一放射性同位素生產設備 RI_{a-c} 包含線性加速器 130_{a-c} 及目標配置 140_{a-c} 。另外，應理解，放射性同位素生產設備 RI_{a-c} 可包含或利用上文參看圖1至圖9所描述之配置及特徵中之任一者。

一般而言，再次參看圖10，在藉由第一電子注入器21a產生之電子束 E_I 不由自由電子雷射FEL使用以產生EUV輻射光束 B_{FEL} 時，執行使用第一放射性同位素生產設備 RI_a 之放射性同位素的產生。偏轉器131將電子束 E_I 引導朝向第一放射性同位素生產設備 RI_a 。第二電子注入器121b可操作以

在此時間期間將電子束E提供至自由電子雷射FEL。設在第二電子注入器121b之後的偏轉器132不將電子束E引導朝向第二放射性同位素生產設備，而是替代地允許電子束行進至線性加速器122。兩個電子注入器121a、121b同時操作，第一電子注入器121a提供用於產生放射性同位素之電子束，且第二電子注入器121b提供由自由電子雷射FEL使用以產生EUV輻射光束 B_{FEL} 之電子束。

第二放射性同位素生產設備 RI_b 具有與第一放射性同位素生產設備 RI_a 相同之一般組態，且因此包含線性加速器130b及目標140b。當第二電子注入器121b提供由放射性同位素生產設備 RI_b 使用以產生放射性同位素之電子束時，第一電子注入器121a提供由自由電子雷射FEL使用以產生EUV輻射光束 B_{FEL} 之電子束。由電子束E行進之路徑因此與圖10中所描繪之彼等者相反。藉由切換偏轉器131、132之組態而達成電子束路徑之切換。第一偏轉器131不再將由第一電子注入器121a產生之電子束引導至第一放射性同位素生產設備 RI_a ，但替代地允許電子束行進至自由電子雷射之線性加速器122。第二偏轉器132將由第二電子注入器121b產生之電子束引導至第二放射性同位素生產設備 RI_b 。

第三放射性同位素生產設備 RI_c 位於線性加速器122之後。線性加速器122為能量恢復線性加速器，且提供電子束 E_R ，能量已自該電子束恢復。此電子束 E_R 具有能量，該能量實質上對應於在電子束E由線性加速器122加速之前自電子注入器121a、121b提供之電子束E的能量。如自電子注入器121a、121b輸出且在線性加速器122中之能量恢復之後的電子束之能量可為(例如)大約10 MeV。

與先前所描述之放射性同位素生產設備相同，第三放射性同位素生產

設備 RI_c 包含線性加速器130c，線性加速器130c經組態以增加電子束中之電子的能量。線性加速器130c可(例如)將電子加速至15 MeV或更大之能量。線性加速器130c可將電子加速至30 MeV或更大之能量(例如，多達大約45 MeV)。在一實施例中，線性加速器130c可將電子加速至大約35 MeV之能量。放射性同位素生產設備進一步包含目標140c。

當不需要使用第三放射性同位素生產設備 RI_c 之放射性同位素生產時，電子束 E_R 引導至光束集堆150，而非引導至第三放射性同位素生產設備。在圖10中，電子束引導至光束集堆150 (如由實線所指示)，且不引導至第三放射性同位素生產設備 RI_c (如由虛線所指示)。然而，電子束 E_R 可由偏轉器133引導朝向第三放射性同位素生產設備 RI_c 。在一實施例中，第三放射性同位素生產設備 RI_c 可操作以與第一(或第二)放射性同位素生產設備 RI_a 、 RI_b 同時產生放射性同位素。

合併器(未圖示)可用於將由電子注入器121a、121b提供之電子束與再循環電子束E組合。拆分器(未圖示)可用於將電子束 E_R (能量已自其恢復)與已由線性加速器122加速之電子束E分離。

儘管圖10展示位於自由電子雷射FEL之線性加速器122之前及之後的放射性同位素生產設備 RI_{a-c} ，但在其他實施例中，可在彼等位置中之僅一者中提供放射性同位素生產設備(亦即，僅在線性加速器之前提供或僅在線性加速器之後提供)。更一般而言，將瞭解，圖10僅為例示性的，且可提供其他配置。舉例而言，在一實施例中，單一電子注入器可具備單一放射性同位素生產設備。

儘管圖10中所說明之實施例為能量恢復線性加速器，但放射性同位素生產設備可作為系統之部分提供，該系統包含具有不為能量恢復線性加速

器之加速器的自由電子雷射FEL。舉例而言，可在自由電子雷射之一或多個電子注入器之後提供放射性同位素生產設備，該自由電子雷射包含不為能量恢復線性加速器之線性加速器。

儘管在圖10中僅描繪單一線性加速器122，但自由電子雷射FEL可包含兩個或多於兩個線性加速器。舉例而言，可在圖10中描繪波盪器124之位置處提供線性加速器。在此情況下，電子束可複數次傳遞通過線性加速器，使得電子束由每一線性加速器加速兩次或多於兩次。在此配置中，可使用光束拆分器來分離經加速電子束，使得其傳遞通過波盪器以產生EUV輻射光束。可隨後使用光束合併器將電子束自波盪器引導回至線性加速器中以用於後續減速。

圖11a至圖11h示意性地描繪例示性目標150a至150f，目標150a至150f可例如與圖1、圖4及圖10中所展示之放射性同位素生產設備中的任一者一起使用。圖11a、圖11b、圖11d、圖11f及圖11g展示目標150a至150e之俯視圖。

圖11a至圖11g中所展示之目標150a至150e各自包含複數個間隔開的部分151a。圖11a至圖11g中所展示之目標150a至150e中之每一者經組態以在該目標經受電子束E (僅展示於圖11f中)時擴展，使得防止複數個部分151a之間的接觸。目標150a至150e中之每一者可經組態以擴展，使得維持複數個部分151a之鄰近部分之間的時間隙或間隔151b。

參看圖11a至圖11e，目標150a至150c可各自包含複數個接觸點151c，在接觸點151c處，複數個部分151a之鄰近部分相接觸。目標150a至150c可各自包含複數個開口151d，複數個開口151d經配置以在複數個接觸點151c中之至少兩個接觸點之間延伸。間隔或間隙151b可為複數個

開口151d之部分或包含於複數個開口151d中。複數個開口151d可經組態以用於接收流過此處之冷卻劑。

圖11a中所展示之目標150a包含可撓性或可變形目標150a。目標150a可經組態以(例如)在目標經受電子束E時在一個或兩個方向上擴展。舉例而言，當目標150a經受由電子束E產生之熱時，目標150a可(例如)在一個或兩個方向上自由擴展，該等方向諸如一個或兩個實質上橫向的方向，如圖11a中之x及y方向所指示。此可允許目標150a (例如)在目標150a經受由電子束E產生之熱時擴展，而不阻塞目標之鄰近部分之間的間隔或間隙151b。藉由防止阻塞目標150b之鄰近部分之間的間隔或間隙151b，冷卻劑可能夠在目標150a之複數個部分之間流動，且因此可防止目標150a之過熱及/或熔融。目標150a在圖11a中展示為包含格型結構。將瞭解，在其他實施例中，目標可包含或蜂巢結構，或複數個開口可具有圓形、正方形或矩形形狀或其類似者。

參看圖11b至圖11e，目標150b、150c之複數個部分151a可包含複數個目標元件151a。在圖11b及圖11d中所展示之實施例中，複數個目標元件151a經配置以形成目標150b、150c。舉例而言，目標元件151a可堆疊或接合在一起以形成目標150b、150c。在圖11b及圖11c中所展示之實施例中，每一目標元件151a包含複數個凹槽。在圖11d及11e中所展示之實施例中，每一目標元件151a包含複數個通孔151f。複數個凹槽151e或通孔151f可配置於目標元件151a中以(例如)在目標元件151a接合在一起以形成目標150b、150c時提供複數個開口151d及接觸點151c。複數個凹槽151e可以複數個波紋之形式提供。複數個通孔151f可以複數個沖孔(punched hole)之形式提供。圖11b及圖11d各自展示接合至彼此之三個目

標元件151a的俯視圖。將瞭解，在其他實施例中，可提供多於或少於三個目標元件。

目標板150b、150c中之複數個通孔151f或波紋151e可(例如)在目標150a、150c經受由電子束E產生之熱時導致熱轉移增加。此可防止阻塞鄰近目標元件151a之間的間隔151b，且可允許冷卻劑在目標元件151a之間流動。因此，可防止目標150b、150c之過熱及/或熔融。

圖11f中所展示之例示性目標150d包含複數個部分151a，複數個部分151a彼此同心地配置。圖11g中所展示之例示性目標150e包含複數個部分151a，複數個部分151a經配置以形成螺旋狀或螺旋形結構。目標150d之同心配置及/或目標150e之螺旋形或螺旋狀結構可允許目標150d、150e(例如)在目標中之每一者經受由電子束E產生之熱時自由擴展，而不阻塞或阻礙目標150d、150e之鄰近部分151a之間的間隔或間隙151b。因此，可防止目標之過熱及/或熔融。如圖11f中之例示性目標150d之俯視圖中所展示，電子束E可在實質上垂直於目標150d、150e之中心或縱向軸線的方向上引導於目標150d、150e上。

圖11h展示用於與放射性同位素生產設備一起使用之另一例示性目標150f。目標150f經組態以(例如)在目標經受電子束E時擴展，使得允許冷卻劑流動通過目標。目標150f可包含多孔結構或材料。該多孔結構或材料可包含發泡體或燒結材料。舉例而言，當經受由電子束E產生之熱時，目標150f之多孔結構或材料可允許目標150f內部變形。歸因於目標150f之孔隙度，可維持冷卻劑流動通過目標150f，且可防止目標150f之過熱及/或熔融。

圖12a及圖12b展示可(例如)與圖1、圖4及圖10中所展示之放射性同位

素生產設備中之任一者一起使用的例示性目標配置152a、152b。目標配置152a、152b各自包含目標153a、153b及目標支撐件154a、154b。目標153a、153b可為或包括上文所描述之目標中之任一者。目標支撐件154a、154b可經組態以相對於電子束E移動或旋轉目標153a、153b。藉由組態目標支撐件154a、154b以相對於電子束E旋轉或移動目標153a、153b，可達成目標153a、153b之均勻激活，此可導致增加的放射性同位素生產。此可導致目標(例如，目標之一部分)上之熱負荷減少。替代或另外地，藉由組態目標支撐件154a、154b以相對於電子束E旋轉或移動目標153a、153b，有可能將電子束E僅自一側引導至目標153a、153b上。此可使使用沿兩個傳播路徑分裂電子束E(如上文所描述)且可為複雜部分的射束分裂器(例如投擲器)不必要。替代或另外地，此可避免長光束線之使用，且可減少此類光束線中所需之磁體及度量衡的量，此可導致光束線及/或放射性同位素生產成本減少。替代或另外地，目標支撐件154a、154b可經組態以可移動地或可旋轉地安裝各別目標153a、153b，(例如)以允許相對於電子束E移動或旋轉目標153a、153b。

圖12a中所展示之例示性目標支撐件154a經組態以(例如)繞橫向軸線A(例如，在實質上垂直於目標153a之縱向軸線的方向上延伸之軸線)移動或旋轉目標153a。目標支撐件154a可經組態以將目標153a旋轉或移動180度，(例如)以允許將目標153a之每一側交替曝露於電子束E。將瞭解，在其他實施例中，目標支撐件可經組態以繞目標之縱向軸線旋轉或移動目標。

圖12b中所展示之例示性目標支撐件154b經組態以繞目標153b之縱向軸線B旋轉移動目標153b。圖12b中所展示之例示性目標153b包括圓柱形

目標153b。將瞭解，在其他實施例中，目標可具有不同形狀，諸如正方形或矩形形狀，及/或可包括複數個目標板，該等目標板可具有正方形、圓形、矩形形狀。

圖12a及圖12b中所展示之例示性目標配置可包括致動器(未圖示)，該致動器可以馬達或其類似者之形式提供。目標153a、153b可安裝於界定軸線A或軸線B之軸上，且致動器可耦接或連接至目標支撐件154a、154b(或其部分)以使得相對於電子束E移動或旋轉目標153a、153b。將瞭解，可致使目標153a、153b以任何適合方式繞軸線A或軸線B旋轉或移動。另外，應理解，軸線A或軸線B無需安置於目標153a、153b中心。

圖13a至圖13c展示例示性目標配置155a、155b、155c，其各自包括外殼156a、156b、156c及用於將電子束E透射至外殼156a、156b、156c中之窗157a、157b、157c。

在圖13a及圖13b中所展示之例示性目標配置中，目標153b及/或目標支撐件154b可配置於外殼156a、156b中以相對於外殼156a、156b及窗157a、157b移動或旋轉目標153b。舉例而言，如圖13b中所展示，可以馬達158之形式提供的致動器可耦接或連接至目標支撐件154b。窗156a可被視為相對於目標153b固定或靜止。此配置可允許目標153b僅自一側經受電子束E，同時目標153b(例如所有目標板)之激活可為相同或均勻的。在使用時，與目標153b相比，外殼155a可經受較高劑量之電子束。儘管窗156a在圖13a及圖13b中展示為具有矩形形狀，但將瞭解，在其他實施例中，窗之形狀可為不同的。舉例而言，窗可以隙縫形式提供，或可具有正方形形狀。圖13b中所展示之目標支撐件154b可相同或至少類似於圖12b中所展示之彼等者。將瞭解，在圖13a中所展示之實施例中，可在外殼

156a中提供或由外殼156a提供目標支撐件(未圖示)。

在圖13c中所展示之例示性目標配置155c中，窗157b經配置以圍繞目標153b。藉由配置窗157b以圍繞目標153b，目標153b可自多於一側曝露於電子束E。舉例而言，目標153b可自兩側(例如，兩個相反側)或自三側或多於三側曝露於電子束E。在圖13c中所展示之實施例中，外殼156c包含上部部分156c'及下部部分156c"。窗157c可配置於外殼156c之上部部分156c'與下部部分156c"之間。

在圖13c中所展示之實施例中，目標支撐件(未圖示)經組態以將外殼156c及/或窗157c與目標153b一起移動或旋轉。外殼156c可為目標支撐件之部分，且可經組態以相對於電子束E旋轉或移動窗157c及目標153b。此可導致窗157c上之熱負荷減少，且可允許目標153b之均勻激活。在圖13c中所展示之例示性目標配置155c中，外殼156c (例如，外殼156c之下部部分156c")耦接或連接至馬達158以用於移動或旋轉外殼156c、窗157c及目標153b。

參看圖13b及圖13c，目標配置155b、155c可包含用於將冷卻劑供應至目標153b之入口159a及用於自目標153b排出冷卻劑之出口159b。入口159a及出口159b可為外殼156b、156c之部分。亦可提供可呈氦冷卻劑形式之冷卻劑以冷卻窗157b、157c。此可由窗157b、157c與目標153b之間的間隔或間隙160促進。

圖14a及圖14b示意性地描繪例示性放射性同位素生產設備，其可包含經組態以將電子束E聚焦於目標160上之電子束聚焦配置(未圖示)。目標160可包含上文所描述之目標中之任一者，及/或可由上文所描述之目標支撐件中之任一者固持。電子束聚焦配置可包含透鏡(未圖示)，該透鏡可

(例如)自磁體形成，且可為多極(例如，四極、六極、八極)透鏡。在此實施例中，目標160可經配置以相對於電子束E固定或靜止。將瞭解，在其他實施例中，目標可相對於電子束移動或旋轉，例如，如上文所描述。藉由將電子束聚焦至目標上，可達成目標上之均勻熱負荷。

圖15a至圖15c展示用於與放射性同位素生產設備一起使用之另一例示性目標配置161。目標配置161包含複數個間隔開的目標元件162及目標支撐件163。目標支撐件163可經組態以懸置複數個目標元件162之一部分以允許目標元件162之部分在至少一個方向上擴展。將瞭解，在其他實施例中，目標支撐件可經組態以懸置所有複數個目標元件。

目標支撐件163可包含可經串聯配置之複數個支撐元件163a。每一支撐元件163a可經組態以懸置目標元件162之一部分，如圖15c中所展示。此可允許移除目標161之部分(例如，一或多個支撐元件163a)以用於恢復經轉換目標材料，例如放射性同位素材料。每一支撐元件163a及相關聯目標元件162可界定梳狀或齒梳狀形狀或結構，如圖15c中所展示。目標元件162可被視為自目標支撐件163 (例如，自每一支撐元件163)延伸，及/或可被視為各自包含自由端。藉由組態目標支撐件163 (或每一/目標支撐元件163a)以懸置目標元件162之至少一部分，可允許在目標配置161之實質上縱向方向(指示為圖15c中之y方向)上擴展目標元件。此可防止在目標配置161中積聚熱應力，此又可允許電子束之電流及/或電流密度增加且可導致目標到放射性同位素材料的轉換增加。

圖15b示意性地描繪目標支撐件163上之目標元件162之配置的仰視圖。如在圖15b中可見，目標元件162經配置以在至少一個方向上交錯。目標元件162可交錯，使得防止電子束之電子自目標161之一側不受阻礙

地行進至目標161之另一側。此可允許增加的放射性同位素生產。在至少一個其他方向上，目標元件162可經配置以彼此成直線。

目標配置可經組態以使得目標元件中之一些具有相同大小且至少一些其他目標元件具有不同大小。舉例而言，一些目標支撐元件163a之目標元件162可具有相同大小，而其他目標支撐元件163之目標元件162具有不同大小，例如寬度或長度。目標元件162之此配置可提供交錯配置。

圖15c示意性地描繪包含相關聯目標元件162之單一目標支撐元件163a。可在鄰近目標元件162之間提供間隔或間隙164。冷卻劑可在鄰近目標元件162之間的間隔或間隙164中流動。選擇間隔或間隙164(例如，間隔或間隙之大小)以允許在至少一個其他方向上擴張或擴展目標元件162。舉例而言，可選擇大小或間隙以允許在一或多個實質上橫向方向上擴張或擴展目標元件162。舉例而言，橫向方向中之一者可沿圖15c中所描繪之x方向，且橫向方向中之另一者可實質上垂直於圖15c中所描繪之x及y方向。鄰近目標元件之間的間隔或間隙之大小可為約0.1 mm。舉例而言，當氮冷卻劑壓力自60巴(6000 kPa)增加至100巴(10000 kPa)時，目標配置161之最大溫度可減小至低於800℃，此溫度低於(例如)鉬之再結晶溫度。在低於800℃之溫度下，當目標配置161經受由電子束產生之熱時，目標元件162之擴展或變形可被視為小的，且目標元件162可不彼此接觸。將瞭解，可取決於供應至目標之冷卻劑的壓力而選擇鄰近目標元件之間的間隔或間隙之大小。

目標配置161可由3-D印刷技術(諸如，選擇性雷射熔融(SLM))製造。目標元件162之大小及/或鄰近目標元件162之間的間隔164可由製造限制判定。

圖15a至圖15c將所有目標元件162展示為自目標支撐件懸置。將瞭解，在其他實施例中，可支撐目標元件之一部分。舉例而言，目標支撐件可包含用於懸置目標元件之一個部分的第一部分及用於支撐目標元件之另一部分之自由端的第二部分。第二部分可經配置以在目標配置之一側或兩個相反側上支撐目標元件。

圖11a至圖15c中所描述之目標中之每一者可包含Mo-100目標。然而，應理解，本發明不受限於此類目標材料，且在其他實施例中，可使用其他目標材料，例如，如下文所描述。

圖16a至圖16e示意性地描繪用於產生放射性同位素之例示性方法的流程圖。圖16a示意性地描繪用於與放射性同位素生產設備一起使用之另一例示性目標。圖16a中所展示之例示性目標165包含第一材料166及第二材料167，第一材料166包含用於轉換成放射性同位素材料之基板材料(未圖示)。第二材料167經組態以保留經轉換基板材料。第二材料167配置於或可配置於第一材料166中以形成目標165。舉例而言，第二材料167可混合至第一材料166中或散置於第一材料166中。然而，第一材料及第二材料可仍然為不同材料。將瞭解，在其他實施例中，第一材料可配置於第二材料中。

第一材料166及第二材料167可包含不同材料，例如在化學上不同的物質。第一材料166與第二材料167之間的轉變可界定邊界168。第一材料166及第二材料167可為不同材料及/或可由邊界168分離。

該方法包含將目標165配置於放射性同位素生產設備中(步驟A)。該方法包含藉由電子束E (未圖示)輻照目標165 (步驟B)。電子束E經組態以致使基板材料之一部分轉換成放射性同位素材料。電子束E經組態以致使經

轉換源材料中之一些位移至第二材料167中。如上文所描述，當電子束E中之電子入射於目標165上時，發射光子。由目標165發射之光子169在圖16b中示意性地描繪為波浪箭頭。當光子入射於基板材料之原子核上時，其引起中子自原子核射出之光致核反應。舉例而言，光子169由基板材料之原子核吸收。此致使基板材料之原子核變成經激發的。經激發原子核藉由中子170之發射而返回至其基態或變成去激發的。基板材料之原子核藉此轉換成放射性同位素原子核171。在一些實施例中，去激發或返回至原子核之基態可致使基板材料之原子裂變。當光子169入射於原子核上時，光子之動量中之一些或全部可轉移於原子核上。此可被稱作核反沖，且可致使原子核及/或經射出中子變成(例如)在第一材料中位移及/或位移至第二材料167中。換言之，核反沖可致使原子核變成植入至第二材料167中。舉例而言，引起上文所描述之光致核反應的光子可具有在10 MeV與50 MeV之間的能量。如上文所描述，光子之能量可取決於電子束中之電子的能量。光子之動量 $p=E/c$ 可由光子入射於之原子核完全吸收。歸因於動量守恆，可具有約100之原子質量單位(AMU)的原子核可接收可在0.5 keV與15 keV之間的動能 $E_{nucl} = \frac{p^2}{2M_{nucl}}$ ，藉此 M_{nucl} 為原子核之質量。在藉由中子之發射而去激發之後，原子核可留存經轉移動量中之一些。自經激發原子核發射之中子可具有 $E_n \cong 1 \text{ Mev}$ 之動能。歸因於動量守恆，原子核可具有以下反衝動能：

$$E_{nucl(1)} = E_n * \frac{M_n}{M_{nucl}} \cong 10 \text{ keV} ,$$

藉此 M_n 為中子之質量。具有10 keV之動能的原子核可在目標中位移約10 nm。此位移或距離在圖16c中由L指示。第二材料167可包含複數個粒子167a。第二材料167之每一粒子167a可具有小於1 μm 之大小或尺寸，

例如，直徑。舉例而言，第二材料167之每一粒子167a可具有約10 nm之大小或尺寸。此可允許放射性同位素原子核170變成自基板材料位移至第二材料167 (例如，其粒子167a)中。將瞭解，在其他實施例中，第一材料可包含複數個粒子，該複數個粒子可各自具有小於1 μm (例如，約10 nm)之大小或尺寸，例如，直徑。替代地，第一材料及第二材料兩者可包含粒子，該等粒子可具有小於1 μm (例如，約10 nm)之大小或尺寸。經位移放射性同位素原子核170在圖16c中由參考數字172指示，且位移由曲線173指示。圖16c展示經發射中子170已位移至第二材料167之粒子167a中。第一材料166中之經發射中子171之軌跡在圖16c中由直線174指示。將瞭解，經發射中子171與第一材料166之間的相互作用可為弱的。

該方法包含將經轉換基板材料(例如，放射性同位素原子核172或放射性同位素材料)之至少部分與第二材料167分離(步驟C)。此步驟可包括在將經轉換基板材料與第二材料167分離之前將第一材料166與第二材料167分離。可(例如)藉由第一材料166之化學或物理蒸發或熔融而將第一材料166與第二材料167分離或自第二材料167移除。圖16d展示第二材料之剩餘粒子167a及經位移或經植入的經轉換基板材料，例如放射性同位素原子核172。隨後至步驟C，可將經轉換材料(例如，放射性同位素原子核172或放射性同位素)與第二材料167分離(步驟D)，如圖16e中所展示。舉例而言，可蝕刻第二材料167，使得僅留存放射性同位素材料。

第二材料167可包含在化學上為惰性或至少穩定的材料。此可促進將第一材料配置於第二材料中。第二材料可包含可以低成本批量生產之材料。可被用作第二材料之例示性材料包含以下各者中之至少一者：石墨烯粒子或薄片、碳粒子或奈米結構(例如，奈米管)、金屬粒子或奈米結構

(例如，金屬奈米線)、膠體或膠體溶液(例如，粒子或奈米粒子之膠體溶液，例如沸石基質)及氧化鋁(例如，氧化鋁(Al_2O_3))粒子或奈米結構(例如，氧化鋁奈米纖維)。舉例而言，氧化鋁奈米纖維可具有約10 nm至15 nm之直徑，且可以任何長度產生，諸如10 cm或更大。例示性氧化鋁奈米纖維可包含結晶 γ 相氧化鋁纖維，結晶 γ 相氧化鋁纖維可具有約155 m^2/g 之表面積、12 GPa之拉伸強度、400 GPa之拉伸模數、具有空位鋁鍵的琢面化表面、0.1 g/cm^3 至0.4 g/cm^3 之容積密度、約30 W/mK之熱導率及/或可在高達1200°C之溫度下維持 γ 相穩定性。例示性氧化鋁奈米纖維可經組態以允許單向纖維對準、在樹脂及/或液體中分散及/或耐火。例示性氧化鋁纖維可包含NAFEN氧化鋁纖維。

例示性目標165可經組態以用於自可被視為穩定之鐳-158 (Dy-158)產生鐳-157 (Dy-157)，Dy-157具有8小時之半衰期。Dy-157可(例如)在醫學診斷方法中找到實用性，諸如單一光子發射電腦斷層攝影術(SPECT)。可藉由將鐳鹽(例如， DyCl_3)與氧化鋁奈米纖維混合或配置來產生目標。鹽可佔據體積之約90%，且氧化鋁奈米纖維可佔據體積之約10%。氧化鋁奈米纖維(例如，平行氧化鋁奈米纖維)之間的距離可在約20 nm至約50 nm之範圍內。如上文所描述，目標165可藉由電子束輻照，且經發射光子可由目標吸收。

圖17a說明在固體中具有10 keV之能量之鐳離子的軌跡。鐳位移或植入至鐳層中約2 nm，且位移或植入至氧化鋁奈米纖維(在圖17a及圖17b中被稱作「藍寶石」)中約10 nm。圖17b說明鐳離子在鐳及氧化鋁奈米纖維中之分佈。自圖17b，可見鐳離子分佈之最大值位於奈米纖維中。圖17c說明核素圖，藉此x軸指示原子核中之中子的數目，且y軸指示原子核中之

質子的數目。自此圖可見，產生大量Dy-157放射性同位素。在圖17c中由參考數字172a指示穩定同位素。缺乏中子之放射性同位素對應於經由正電子發射或電子俘獲衰變的同位素在圖17c中由參考數字172b指示。在藉由電子束輻照目標165之後，可移除鹽，且可(例如)藉由使用鹼性溶液(諸如，氫氧化鉀(KOH)或氫氧化鈉(NaOH)溶液)來蝕刻氧化鋁奈米纖維。在已蝕刻氧化鋁奈米纖維之後，可自溶液提取Dy-157放射性同位素。

另一例示性目標165可經組態以用於自鐳-226 (Ra-226，其具有1600年之半衰期)產生鐳-224 (Ra-224)，Ra-224為 α 射線發射體且具有3.7天之半衰期。Ra-224可(例如)在醫學診斷方法中找到實用性，諸如癌組織或腫瘤之靶向療法。上文所描述之方法可用於自Ra-226產生Ra-224且將Ra-224同位素與載體材料分離。反應($\gamma, 2n$)之副產物可為鐳-225 (Ra-225)，Ra-225可大量生產且可用於SPECT成像。透過藉由電子束輻照目標，如上文所描述，與藉由質子束輻照產生Ra-224相比，裂變產物之量可減少。

另一例示性目標165可經組態以自釷-228 (Th-228)產生Ra-224，Th-228具有2年之半衰期。包含釷-232 (Th-232)之第一材料可與氧化鋁奈米纖維混合以形成目標。目標可由電子束輻照。可重複對第一材料之輻照。如上文所描述，歸因於Th-232與光子之光致核反應($\gamma, 4n$)，可產生Th-230、Th-229、Th-228及鏷-231 (Pa-231)。藉由重複藉由電子束輻照目標，可自Th-228產生Ra-224。可隨後將Ra-224同位素與氧化鋁奈米纖維分離，如上文所描述。此可允許藉由使用與其他方法中所需之量相比減少之量的化學物質將Ra-224與釷分離。

另一例示性目標可經組態以用於自可為穩定之鎳-64產生鎳-63。Ni-

63可(例如)在高功率供電裝置中找到實用性，諸如用於嵌入式電子件之 β 衰變驅動(β 伏打)電池。Ni-63之提供可允許製造可具有100年壽命之小型化電源供應器裝置。包含Ni-64之第一材料可與第二材料混合以形成目標。目標可藉由電子束輻照，且歸因於Ni-64與光子之光致核反應(γ, n)，可產生Ni-63。如上文所描述，Ni-63可與載體材料分離。本文中所揭示之例示性方法可被視為用於產生Ni-63之替代方法，該方法可不依賴於反應器(諸如，高通量中子反應器或其類似者)之使用。替代或另外地，與來自反應器之Ni-63之產率相比，Ni-63之產率可增加。

儘管用於產生放射性同位素之以上例示性方法已描述為包含藉由電子束輻照目標，但將瞭解，在其他實施例中，可藉由質子、氬核或離子束輻照目標。藉由此類光束輻照目標可致使放射性同位素在第二材料中之位移增加。然而，源材料之一些原子可位移至第二材料中而不發生光致核反應。

儘管在上文所描述之例示性方法中，中子自原子核射出，但由於光致核反應，將瞭解，在其他實施例中，不同光致核反應可致使質子或 α 粒子自原子核射出。在一些實施例中，不同光致核反應可產生裂變產物。應理解，上文所描述之方法可用於產生由不同光致核反應產生之原子核或裂變產物。

圖18、圖19及圖21示意性地描繪可與放射性同位素生產設備一起使用之另一目標配置175。目標配置包含目標176，目標176可包含複數個目標板176a。目標176由支撐結構(未圖示)固持。目標176安裝於腔室177中。腔室177包含分離元件178，分離元件178將腔室177與電子注入器及電子源(未圖示)分離。分離元件178可界定腔室177之一部分(例如，側

壁)。分離元件178包含電子束E可進入腔室177所通過之孔隙179。藉由允許電子束通過分離元件中之孔隙進入腔室，可減少分離元件上可由電子束產生之熱負荷。此可導致分離元件之壽命增加。在圖18、圖19及圖21中所展示之目標配置可被視為「無窗」目標配置。所描述分離元件可被視為替代可用於將目標與電子束環境隔離之窗。

分離元件178可具備孔隙179以減少目標176與電子束環境180 (例如，電子注入器(未圖示)及/或電子加速器(未圖示)或其各別部分)之間的壓力差。如上文所描述，目標176可(例如)藉由氣體冷卻劑冷卻。在圖18、圖19及圖21中所展示之實例中，藉由氦(He) 176b之流動冷卻目標176。舉例而言，可在約75巴(7500 kPa)之壓力下將氦冷卻劑176b供應至目標176。分離元件178可配置於腔室177中，以便允許氦冷卻劑176b通過孔隙179流動至電子束環境180中。此可導致電子束環境180中之壓力增加。舉例而言，電子束環境180之壓力可在真空至1巴之氦的範圍內。氦冷卻劑176b流動通過孔隙179可允許目標176或腔室177與電子束環境180之間的壓力差減小。此可防止歸因於目標或腔室177與電子束環境180之間的壓力差而損壞分離元件，例如分離元件178之斷裂。因此，可減少歸因於分離元件之斷裂的電子束環境之污染風險。可提供一或多個抽汲或抽吸裝置181 (例如，一或多個差動泵及/或增壓泵)以使電子束環境中之壓力最小化。

腔室177可包含電子束轉向部分182，電子束轉向部分182可配置於分離元件178與目標176之間。在電子束轉向部分182中，電子束可(例如)藉由使用自磁體182a形成之透鏡來散焦以將光束放大至所要尺寸以用於輻照目標176，如圖21中所展示。可在70巴(7000 kPa)之壓力下將氦冷卻劑

176b供應至電子束轉向部分182。此可導致歸因於電子束之電子與氦原子碰撞而使電子束之能量減少。對於具有約60 MeV之能量的電子束，在約70巴(7000 kPa)之氦壓力下，電子束之能量的減少可為約3 MeV。能量之此減少可被視為可接受的。歸因於光束轉向部分中之氦壓力，可提供腔室177及/或目標176之冷卻。

可取決於電子束E之大小(例如，準直)而選擇分離元件中之孔隙179的大小或直徑。舉例而言，電子束之大小可低於0.1 mm，在此情況下孔隙之大小或直徑可為約1 mm。對於電子束轉向部分182中之(例如) 70巴(7000 kPa)之氦壓力，此大小可導致通過孔隙179之氦冷卻劑176b流率為約0.005 kg/s。若孔隙179之大小增加至2 mm，則氦冷卻劑通過孔隙之流率可為約0.02 kg/s。孔隙179可被視為臨界流動限制件。

在圖19中所展示之例示性目標配置175中，腔室177可另外包含屏蔽元件，屏蔽元件可以屏蔽板183之形式提供。屏蔽板183可包含電子束E傳遞至目標176所通過之孔隙184。屏蔽板183可配置於分離元件178與目標176之間。屏蔽板之孔隙184可大於分離元件178之孔隙179。舉例而言，屏蔽板183之孔隙184可具有約20 mm之大小或直徑。歸因於分離元件178中之孔隙179，壓力差可跨越目標176 (例如，目標176之第一板176a)起作用。目標176之第一板可經配置以接近分離元件178。藉由將屏蔽板183配置於腔室177中，可減少作用於目標176 (例如，目標176之第一板)之壓力差。屏蔽板183可經配置以平衡通過分離板178之孔隙179自目標176至電子束環境180的氦冷卻劑176b流動。腔室177可包含部分185，部分185在屏蔽板183與目標176之間延伸。可例如在與供應至目標176之氦壓力相同的壓力下向腔室之部分185供應氦冷卻劑176b。藉由在與供應至目標之氦

壓力相同的壓力下向腔室177之部分185供應氮冷卻劑176b，可增加目標176之冷卻。

圖20a至圖20c示意性地描繪腔室177中在分離元件178與屏蔽板183之間及在屏蔽板183與目標176之間的氮冷卻劑176b流動。可調整在分離元件178與屏蔽板183之間及/或在屏蔽板183與目標176之間的氮冷卻劑176b流動以在腔室177之部分185中產生壓力分佈，該壓力分佈可類似於目標176處之壓力分佈。

放射性同位素生產設備可包含冷卻設備(未圖示)。冷卻設備可經組態以將氮冷卻劑176b提供至目標176及/或腔室177，如上文所描述。在圖20a之實例中，冷卻設備可經組態以將氮冷卻劑176b提供至腔室177之部分185及/或自部分185提取氮冷卻劑176b。冷卻設備可經組態以在75巴(7500 kPa)之壓力下向部分185供應氮冷卻劑176b。例如，由冷卻設備自目標176及/或部分185提取之氮冷卻劑可具有約65巴(6500 kPa)之壓力。

在圖20b之實例中，冷卻設備可經組態以另外將氮冷卻劑176b供應至腔室177之另一部分186。該另一部分可在分離元件178與屏蔽板183之間延伸。冷卻設備可(例如)在70巴(7000 kPa)之壓力下向另一部分186供應氮冷卻劑176b。該另一部分可為電子束轉向部分182或其部分之部分或包含於電子束轉向部分182或其部分中。

在圖20c之實例中，冷卻設備可經組態以另外將氮冷卻劑176b供應至腔室177之另一部分186且自另一部分186提取氮冷卻劑176b。

圖21示意性地描繪目標配置175之另一實例。圖21中所描繪之目標配置類似於圖18中所描繪之彼目標配置。然而，在圖21中所描繪之實例中，腔室177包含另一分離元件187。另一分離元件187可包含另一孔隙

188。另一分離元件187之另一孔隙188可具有與分離元件178之孔隙179相同或不同的大小。藉由配置包含另一孔隙之另一分離元件，可減少至電子束環境180之氮冷卻劑176b流動。

在一實施例中，包含自由電子雷射及放射性同位素生產設備之系統可經組態以提供具有10 mA或更大之電流的電子束。由系統提供之電流可(例如)為20 mA或更大或可為30 mA或更大。電流可(例如)高達100 mA或更大。因為具有高電流(例如，10 mA或更大)之電子束增加由放射性同位素生產設備產生之放射性同位素的比活性，所以該電子束為有利的。

如上文進一步所解釋，可使用藉由電子束擊中電子目標產生之極硬X射線光子將Mo-100轉換為Mo-99 (所需放射性同位素)。Mo-99之半衰期為66小時。由於此半衰期，存在對在以Mo-100開始時可提供的Mo-99之比活性之限制，該限制由產生Mo-99之速率判定。若(例如)使用大約1 mA至3 mA之電子束電流在相對較低的速率下產生Mo-99，則可能不可能在目標中提供Mo-99之多於大約40 Ci/g之比活性。此係因為儘管可增加輻照時間以便允許產生更多Mo-99原子，但彼等原子之顯著比例將在輻照時間期間衰變。在歐洲用於醫療應用中之Mo-99之比活性的臨限值應為100 Ci/g，且因此具有40 Ci/g或更小之比活性的Mo-99不適用。

當使用較高電子束電流時，產生Mo-99原子之速率相應地增加(假設接收光子之Mo-99之體積保持相同)。因此，舉例而言，對於Mo-99之給定體積，10 mA之電子束電流將在由1 mA之電子束電流提供之產生速率10倍的速率下產生Mo-99。由本發明之實施例使用之電子束電流可足夠高以達成超過100 Ci/g之Mo-99之比活性。舉例而言，本發明之實施例可提供具有大約30 mA之射束電流的電子束。模擬指示，對於大約30 mA之射束

電流，若電子束具有大約35 MeV之能量且Mo-100目標之體積為大約5000 mm³，則可獲得超過100 Ci/g之Mo-99之比活性。Mo-100目標可(例如)包含具有大約25 mm之直徑及大約0.5 mm之厚度的20個板。可使用其他數目個可具有非圓形形狀且可具有其他厚度之板。

如上文進一步所提及，本發明之實施例之電子注入器可為由脈衝式雷射光束照明之光電陰極。雷射可(例如)包含Nd：YAG雷射連同相關聯光學放大器。雷射可經組態以產生皮秒雷射脈衝。可藉由調整脈衝式雷射光束之功率而調整電子束之電流。舉例而言，增加脈衝式雷射光束之功率將增加自光電陰極發射之電子的數目且因此增加電子束電流。

由根據本發明之實施例之放射性同位素生產設備接收之電子束可(例如)具有1 mm之直徑及1 mrad之發散度。增加電子束中之電流將趨向於致使電子歸因於空間電荷效應而擴散開，且因此可增加電子束之直徑。增加電子束之電流可因此降低電子束之亮度。然而，放射性同位素生產設備不需要具有(例如) 1 mm之直徑之電子束且可利用具有更大直徑之電子束。因此，增加電子束之電流可不將光束之亮度降低至明顯不利地影響放射性同位素生產的範圍。實際上，提供具有大於1 mm之直徑的電子束可為有利的，此係因為其擴散由電子束遞送之熱負荷。然而，將瞭解，亦可使用其他注入器類型。

儘管已結合放射性同位素Mo-99之產生描述本發明之實施例，但本發明之實施例可用於產生其他放射性同位素。一般而言，本發明之實施例可用於產生可經由將極硬X射線引導至源材料上而形成之任何放射性同位素。

本發明之優點為其提供放射性同位素之產生而無需使用高通量核反應

器。另一優點為其不需要使用高度濃縮之鈾(需遵守不擴散法規之危險材料)。

提供放射性同位素生產設備作為亦包含自由電子雷射之系統之部分係有利的，此係因為其利用已由自由電子雷射需要之設備。亦即，放射性同位素生產使用部分已提供之設備。類似地，放射性同位素生產設備可位於地下空間(其可被稱為地堡)中，該地下空間包括抑制輻射且防止其擴散至環境之屏蔽件。地下空間及屏蔽件中之至少一些可已作為自由電子雷射之部分而提供，且因此避免提供用於放射性同位素生產設備之完全單獨地下空間及相關聯屏蔽件的費用。

在一實施例中，系統可包含能夠獨立於彼此操作之自由電子雷射及放射性同位素生產設備。舉例而言，自由電子雷射可能夠在無放射性同位素生產設備操作之情況下操作，且放射性同位素生產設備可能夠在無自由電子雷射操作之情況下操作。自由電子雷射及放射性同位素生產設備可提供於共同地堡中。

雖然輻射源SO之實施例已描述及描繪為包含自由電子雷射FEL，但應瞭解，輻射源可包含任何數目個自由電子雷射FEL。舉例而言，輻射源可包含多於一個自由電子雷射FEL。舉例而言，兩個自由電子雷射可經配置以將EUV輻射提供至複數個微影設備。此係為了允許一些冗餘。此可允許在一個自由電子雷射正被修復或經歷維修時使用另一自由電子雷射。

儘管本發明之實施例已描述為使用Mo-100以產生衰變成Tc-99之Mo-99放射性同位素，但可使用本發明之實施例產生其他醫療適用之放射性同位素。舉例而言，本發明之實施例可用於產生衰變成Ga-68之Ge-68。本發明之實施例可用於產生衰變成Re-188之W-188。本發明之實施例可用於

產生衰變成Bi-213、Sc-47、Cu-64、Pd-103、Rh-103m、In-111、I-123、Sm-153、Er-169及Re-186之Ac-225。

應理解，上圖1至圖9及圖11a至圖21中所描繪之實施例可以任何適合組合組合，如熟習此項技術者將自以上教示顯而易見。舉例而言，參看圖1及圖3描述可在光子目標之任一側提供兩個電子目標。應理解，此配置可與其他所描述配置組合，諸如參看圖1及圖5至圖8所描述之彼等配置。

微影系統LS (諸如，圖10中所描繪之彼微影系統)可包含任何數目個微影設備。形成微影系統LS之微影設備之數目可(例如)取決於自輻射源SO輸出之輻射的量及在光束遞送系統BDS中損耗之輻射的量。形成微影系統LS之微影設備之數目可另外或替代地取決於微影系統LS之佈局及/或複數個微影系統LS之佈局。

微影系統LS之實施例亦可包括一或多個光罩檢驗設備MIA及/或一或多個空中檢驗量測系統(AIMS)。在一些實施例中，微影系統LS可包含複數個光罩檢測設備以允許一些冗餘。此可允許在一個光罩檢測設備正被修復或經歷維修時使用另一光罩檢測設備。因此，一個光罩檢測設備始終可供使用。光罩檢測設備可比微影設備使用較低功率的輻射光束。另外，將瞭解，使用本文中所描述之類型之自由電子雷射FEL產生的輻射可用於除了微影或微影相關應用以外的應用。

將進一步瞭解，包含如上文所描述之波盪器的自由電子雷射可用作用於數個用途(包括但不限於微影)之輻射源。

術語「相對論電子」應被解釋為意謂具有相對論能量之電子。電子可被視為在其動能與其靜止質量能量(以自然單位計511 keV)相當或大於其靜止質量能量時具有相對論能量。實務上，形成自由電子雷射之部分的粒

子加速器可將電子加速至比其靜止質量能量大得多的能量。舉例而言，粒子加速器可將電子加速至 $>10\text{ MeV}$ 、 $>100\text{ MeV}$ 、 $>1\text{ GeV}$ 或更大之能量。

已在輸出EUV輻射光束之自由電子雷射FEL的上下文中描述了本發明之實施例。然而，自由電子雷射FEL可經組態以輸出具有任何波長之輻射。本發明之一些實施例可因此包含輸出不為EUV輻射光束之輻射光束的自由電子。

術語「EUV輻射」可被視為涵蓋具有在 4 nm 至 20 nm 之範圍內(例如，在 13 nm 至 14 nm 之範圍內)的波長之電磁輻射。EUV輻射可具有小於 10 nm 之波長，例如，在 4 nm 至 10 nm 之範圍內的波長，諸如， 6.7 nm 或 6.8 nm 。

微影設備 LA_a 至 LA_n 可用於IC之製造中。替代地，本文中所描述之微影設備 LA_a 至 LA_n 可具有其他應用。可能的其他應用包括製造整合式光學系統、用於磁疇記憶體之引導及偵測圖案、平板顯示器、液晶顯示器(LCD)、薄膜磁頭等。

不同實施例可彼此組合。實施例之特徵可與其他實施例之特徵組合。另外，將瞭解，雖然上文所描述之實施例指微影且特別指使用自由電子雷射之微影，但本發明不限於此等實施例，且可根據本發明之實施例在具有足夠光束能量之任何自由電子雷射中產生彼等放射性同位素。

雖然上文已描述本發明之特定實施例，但將瞭解，可以與所描述不同之其他方式來實踐本發明。以上描述意欲為說明性而非限制性的。因此，對於熟習此項技術者將顯而易見，可在不脫離下文所闡明之申請專利範圍之範疇的情況下對所描述之本發明進行修改。

【符號說明】

10	電子注入器
20	電子加速器/線性加速器
30	目標
31	支撐件
32	目標板
33	支撐結構
33a	支撐結構
33b	支撐結構
34	電子目標
34a	電子目標
34b	電子目標
40	電子束分裂器
50	偏轉器
60	第二偏轉器/第二電子束分佈設備
70	目標配置
71	電子目標
72	光子目標
73	窗
74	外殼
75	窗
76	第一腔室
76a	水
77	第二腔室

77a	氮
80	動態電子目標配置
81	電子目標
90	動態電子目標配置
91	電子目標
92	管
100	動態電子目標配置
101a	電子目標儲集器
101b	電子目標儲集器
102	供應管
103	電子目標
110	光子目標
111	穿孔
112	中心部分
113	外部部分
121a	第一電子注入器
121b	第二電子注入器
122	線性加速器
124	波盪器
130a	線性加速器
130b	線性加速器
130c	線性加速器
131	第一偏轉器

132	第二偏轉器
133	偏轉器
140a	目標配置
140c	目標
150	光束集堆
150a	目標
150b	目標
150c	目標
150d	目標
150e	目標
150f	目標
151a	目標元件
151b	間隔
151c	接觸點
151d	開口
151e	凹槽
151f	通孔
152a	目標配置
152b	目標配置
153a	目標
153b	目標
154a	目標支撐件
154b	目標支撐件

155a	目標配置
155b	目標配置
155c	目標配置
156a	外殼
156b	外殼
156c	外殼
156c'	上部部分
156c''	下部部分
157a	窗
157b	窗
157c	窗
158	馬達
159a	入口
159b	出口
160	目標
161	目標配置
162	目標元件
163	目標支撐件
163a	支撐元件
164	間隙
165	目標
166	第一材料
167	第二材料

167a	粒子
168	邊界
169	光子
170	中子
171	放射性同位素原子核/經發射中子
172	放射性同位素原子核
172a	Dy-157放射性同位素
172b	放射性同位素
173	曲線
174	直線
175	目標配置
176	目標
176a	目標板
176b	氮冷卻劑
177	腔室
178	分離元件
179	孔隙
180	電子束環境
181	抽吸裝置
182	電子束轉向部分
182a	磁體
183	屏蔽板
184	孔隙

185	部分
186	部分
187	分離元件
188	孔隙
A	橫向軸線
A-A	軸線
B	橫向軸線
B _{FEL}	EUV輻射光束
E	電子束
E _R	電子束
FEL	自由電子雷射
LA _{1-n}	微影設備
RI	放射性同位素生產設備
RI _a	第一放射性同位素生產設備
RI _b	第二放射性同位素生產設備
RI _c	第三放射性同位素生產設備
x	方向
y	方向
γ	光子



201727666

申請日: 105/11/04

【發明摘要】

IPC分類: ~~G21G 1/12~~ (2006.01)
G21K 5/04 (2006.01)
G21K 5/08 (2006.01)
G21K 5/10 (2006.01)

【中文發明名稱】

放射性同位素生產

【英文發明名稱】

RADIOISOTOPE PRODUCTION

【中文】

本發明係關於一種放射性同位素生產設備，其包含經配置以提供一電子束之一電子源。該電子源包含一電子注入器及一電子加速器。該放射性同位素生產設備進一步包含：一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及一射束分裂器，其經配置以沿一第一路徑將該電子束之一第一部分引導朝向該目標之一第一側且沿一第二路徑將該電子束之一第二部分引導朝向該目標之一第二側。

【英文】

A radioisotope production apparatus comprising an electron source arranged to provide an electron beam. The electron source comprises an electron injector and an electron accelerator. The radioisotope production apparatus further comprises a target support structure configured to hold a target and a beam splitter arranged to direct a first portion of the electron beam along a first path towards a first side of the target and to direct a second portion of the electron beam along a second path towards a second side of the target.

【指定代表圖】

圖1

【代表圖之符號簡單說明】

10	電子注入器
20	電子加速器/線性加速器
30	目標
40	電子束分裂器
E	電子束
RI	放射性同位素生產設備

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種放射性同位素生產設備，其包含：

一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；

一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及

一射束分裂器，其經配置以沿一第一路徑將該電子束之一第一部分引導朝向該目標之一第一側且沿一第二路徑將該電子束之一第二部分引導朝向該目標之一第二側。

【第2項】

如請求項1之放射性同位素生產設備，其中該射束分裂器包含一偏轉器。

【第3項】

如請求項1或2之放射性同位素生產設備，其中該電子束包含複數個脈衝，且該射束分裂器經配置以實質上沿該第一路徑引導該等脈衝之一半且沿該第二路徑引導該等脈衝之一半。

【第4項】

如請求項1或2之放射性同位素生產設備，其中該目標包含一電子目標及一光子目標；且

其中該電子目標經配置以接收該電子束之該第一部分及該第二部分中的至少一者且朝向該光子目標發射光子。

【第5項】

如請求項4之放射性同位素生產設備，其中該電子目標包含經配置以

接收該電子束之該第一部分的一第一部分及經配置以接收該電子束之該第二部分的一第二部分。

【第6項】

如請求項5之放射性同位素生產設備，其中該電子目標之該第一部分及該第二部分安置於該光子目標之任一側。

【第7項】

如請求項1或2之放射性同位素生產設備，其進一步包括一冷卻設備，該冷卻設備經配置以將一流體冷卻劑提供至該目標。

【第8項】

如請求項7之放射性同位素生產設備，當從屬於請求項4至6中任一項時，其中該冷卻設備經配置以將一液體冷卻劑提供至該電子目標且將一氣體冷卻劑提供至該光子目標。

【第9項】

如請求項8之放射性同位素生產設備，其中該冷卻設備經配置以在高於該液體冷卻劑之一壓力下提供該氣體冷卻劑。

【第10項】

一種放射性同位素生產設備，其包含：

一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；

一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及

一第一電子束分佈設備及一第二電子束分佈設備，其一同經配置以在該目標之一表面上方掃描該電子束。

【第11項】

如請求項10之放射性同位素生產設備，其中該第一射束分佈設備為經配置以朝向該第二電子束分佈設備將該電子束掃掠通過一預定角度之一偏轉器。

【第12項】

如請求項10或11之放射性同位素生產設備，其中該第二射束分佈設備為一偏轉器及一透鏡中之一者。

【第13項】

如請求項10或11之放射性同位素生產設備，其進一步包含一射束分裂器，其經配置以沿一第一路徑將該電子束之一第一部分引導朝向該目標之一第一側且沿一第二路徑將該電子束之一第二部分引導朝向該目標之一第二側。

【第14項】

如請求項13之放射性同位素生產設備，其中該第一射束分佈設備及該第二射束分佈設備係沿該第一路徑安置。

【第15項】

如請求項14之放射性同位素生產設備，其進一步包含第三射束分佈設備及第四射束分佈設備，該第三射束分佈設備與該第四射束分佈設備一同經配置以在該目標之另一表面上方掃描該電子束，該第三射束分佈設備及該第四射束分佈設備係沿該第二路徑安置。

【第16項】

如請求項10或11之放射性同位素生產設備，其中該目標包含一電子目標及一光子目標；且

其中該電子目標經配置以自該第二電子束分佈設備接收該電子束且

朝向該光子目標發射光子。

【第17項】

如請求項16之放射性同位素生產設備，當從屬於請求項15時，其中該電子目標包含經配置以自該第一分佈設備及該第二分佈設備接收該電子束之該第一部分的一第一部分及經配置以自該第三分佈設備及該第四分佈設備接收該電子束之該第二部分的一第二部分。

【第18項】

一種放射性同位素生產設備，其包含：

一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；及

一電子目標支撐結構，其經組態以固持一電子目標以接收該電子束以便產生光子；及

一光子目標支撐結構，其經組態以固持一光子目標以用於接收該等光子中之至少一些。

【第19項】

如請求項18之放射性同位素生產設備，其中該放射性同位素生產設備經組態以誘發該電子目標與該電子束之間的相對移動。

【第20項】

如請求項19之放射性同位素生產設備，其進一步包含一電子束分佈設備，該電子束分佈設備經配置以相對於該電子目標移動該電子束。

【第21項】

如請求項20之放射性同位素生產設備，其中該電子束分佈設備包含一射束偏轉器，該射束偏轉器經組態以在該電子目標之該表面上方掃描該

電子束。

【第22項】

如請求項20或21之放射性同位素生產設備，其中該電子束分佈設備包含一透鏡，該透鏡經組態以使該電子束準直。

【第23項】

如請求項18至21中任一項之放射性同位素生產設備，其中該電子目標支撐結構經組態以相對於該電子束移動該電子目標。

【第24項】

如請求項23之放射性同位素生產設備，其中該電子目標支撐結構經組態以旋轉該電子目標。

【第25項】

如請求項23之放射性同位素生產設備，其中該電子目標為液體，且該電子目標支撐結構經組態以致使該電子目標流動通過一電子束目標區。

【第26項】

如請求項18至21中任一項之放射性同位素生產設備，其進一步包含一冷卻設備，該冷卻設備經配置以將一流體冷卻劑提供至該目標。

【第27項】

如請求項26之放射性同位素生產設備，其中該冷卻設備經配置以將一液體冷卻劑提供至該目標之一電子目標部分且將一氣體冷卻劑提供至該目標之一光子目標部分。

【第28項】

如請求項27之放射性同位素生產設備，其中該冷卻設備經配置以在高於該液體冷卻劑之一壓力下提供該氣體冷卻劑。

【第29項】

如請求項28之放射性同位素生產設備，其中該冷卻設備經配置以在大致70巴之一壓力下將一氮冷卻劑提供至該光子目標，且在大致1巴之一壓力下將一水冷卻劑提供至該電子目標。

【第30項】

一種放射性同位素生產設備，其包含：

一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；

一腔室，其容納經組態以將一目標固持於該電子束之一路徑中的一目標支撐結構；及

一窗，該電子束通過其進入該腔室；

其中該窗包含碳化矽。

【第31項】

如請求項30之放射性同位素生產設備，其中該窗為穹狀的。

【第32項】

如請求項30或31之放射性同位素生產設備，其中該窗係藉由化學氣相沈積製造，使得該腔室經密閉性密封。

【第33項】

如請求項32之放射性同位素生產設備，其中該窗具有在85 mm與4000 mm之間的一曲率。

【第34項】

一種產生具有在一所要範圍內之一比活性的一放射性同位素之方法，其包含：

使用放射性同位素生產設備來產生一放射性同位素，該放射性同位素生產設備包含：

一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；

一目標支撐結構，其經組態以固持一目標；及

實體地分離具有在該所要範圍內之一比活性的該放射性同位素之至少一部分。

【第35項】

如請求項34之產生一放射性同位素之方法，其進一步包含曝露在將該目標曝露於該電子束以產生該放射性同位素之前對該目標穿孔。

【第36項】

如請求項34或35之方法，其中該放射性同位素生產設備為如請求項1至33中任一項之一放射性同位素生產設備。

【第37項】

一種系統，其包含：

如請求項1至33中任一項之一放射性同位素生產設備；及

一自由電子雷射，其包含一能量恢復電子加速器及一波盪器；

其中該放射性同位素生產設備之該電子加速器經定位以在一電子束已由該能量恢復電子加速器加速接著減速之後接收該電子束，該放射性同位素生產設備之該電子加速器經組態以將該電子束之電子加速至大約14 MeV或更大之一能量，以用於後續遞送至該放射性同位素生產設備之該電子目標。

【第38項】

一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標，該目標包含複數個間隔開之部分，該目標經組態以在該目標經受一電子束時擴展，使得防止該複數個部分之間的接觸。

【第39項】

如請求項38之目標，其中該目標經組態以擴展，使得維持該複數個部分之鄰近部分之間的一間隙或間隔。

【第40項】

如請求項38或39之目標，其中該目標包含：複數個接觸點，在該複數個接觸點處，該複數個部分之鄰近部分相接觸；及複數個開口，其經配置以在該複數個接觸點中之至少兩個接觸點之間延伸。

【第41項】

如請求項38或39之目標，其中該目標包含一可撓性或可變形目標。

【第42項】

如請求項38或39之目標，其中該目標包含一格型結構或一蜂巢結構。

【第43項】

如請求項38或39之目標，其中該複數個部分包含複數個目標元件，該複數個目標元件經配置以形成該目標，每一目標元件包含複數個凹槽或通孔。

【第44項】

如請求項38或39之目標，其中複數個部分中之該等部分相對於彼此同心地配置。

【第45項】

如請求項38或39之目標，其中該複數個部分經配置以形成一螺旋狀或螺旋形結構。

【第46項】

一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標，該目標經組態以在該目標經受一電子束時擴展，使得允許一冷卻劑流動通過該目標。

【第47項】

如請求項46之目標，其中該目標包含一多孔結構或材料。

【第48項】

如請求項47之目標，其中該多孔結構或材料包含一發泡體或燒結材料。

【第49項】

一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標配置，該目標配置包含：

一目標；及

一目標支撐結構，該目標支撐結構經組態以相對於一電子束移動或旋轉該目標。

【第50項】

如請求項49之目標配置，其中該目標包含如請求項38至48中任一項之一目標。

【第51項】

如請求項49或50之目標配置，其中該目標支撐結構經組態以繞該目標之一橫向軸線或一縱向軸線移動或旋轉該目標。

【第52項】

如請求項49或50之目標配置，其中目標配置包含一外殼及用於將該電子束透射至該外殼中之一窗。

【第53項】

如請求項52之目標配置，其中目標支撐結構配置於該外殼中以相對於該外殼及該窗移動或旋轉該目標。

【第54項】

如請求項52之目標配置，其中該窗經配置以圍繞該目標，且該目標支撐結構經組態以將該外殼及窗與該目標一起移動或旋轉。

【第55項】

一種放射性同位素生產設備，其包含：

一電子源，其經配置以提供一電子束，該電子源包含一電子注入器及一電子加速器；及

一目標配置，其用於相對於該電子束配置一目標；及

一電子束聚焦配置，其經組態以將該電子束聚焦於該目標上。

【第56項】

如請求項55之放射性同位素生產設備，其中該目標配置包含如請求項49至54中任一項之一目標配置。

【第57項】

一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標配置，該目標配置包含：

一目標，其包含複數個間隔開之目標元件；及

一目標支撐結構，其經組態以懸置該複數個目標元件之一部分以允許目標元件之該部分在至少一個方向上擴展。

【第58項】

如請求項57之目標配置，其中該複數個目標元件經配置以在該目標之至少一個方向上交錯且在該目標之至少一個其他方向上成直線。

【第59項】

如請求項57或58之目標配置，其中該目標支撐結構包含複數個支撐元件，每一支撐元件經組態以懸置該複數個目標元件之一部分。

【第60項】

如請求項57或58之目標配置，其中該目標支撐結構包含用於懸置該複數個目標元件之該部分的一第一部分及用於支撐該複數個目標元件之另一部分之一自由端的一第二部分。

【第61項】

如請求項57或58之目標配置，其中選擇該複數個目標元件之鄰近目標元件之間的一間隔以允許在至少一個其他方向上擴張或擴展該等目標元件。

【第62項】

一種用於與一放射性同位素生產設備一起使用之目標，該目標包含：

一第一材料，該第一材料包含用於轉換成一放射性同位素之一基板材料；

一第二材料，該第二材料經組態以保留經轉換基板材料，其中該第二材料配置或可配置於該第一材料中以形成該目標。

【第63項】

如請求項62之目標，其中該基板材料包含鐳-158 (Dy-158)、鐳-226

(Ra-226)、釷(Th-228)及鎳-64 (Ni-64)中之至少一者。

【第64項】

如請求項62或63之目標，其中該第二材料包含複數個粒子，每一粒子具有約10 nm之一大小或直徑。

【第65項】

如請求項62或63之目標，其中該第二材料包含石墨烯、碳及金屬中之至少一者。

【第66項】

如請求項62或63之目標，其中該第二材料包含一膠體或膠體溶液。

【第67項】

一種產生一放射性同位素之方法，該方法包含：

將一目標配置於一放射性同位素生產設備中，該目標包含：

一第一材料，該第一材料包含用於轉換成一放射性同位素之一基板材料；

一第二材料，該第二材料經組態以保留經轉換基板材料，其中該第二材料配置或可配置於該第一材料中以形成該目標；

藉由一電子束輻照該目標，該電子束經組態以致使該基板材料之一部分轉換成該放射性同位素，該電子束經組態以致使該經轉換基板材料中之一些位移至該第二材料中；及

將該經轉換基板材料與該第二材料分離。

【第68項】

如請求項67之方法，其中該分離之步驟包含：在將該經轉換基板材料與該第二材料分離之前將該第二材料與該第一材料分離。

【第69項】

一種放射性同位素生產設備，其包含：

一電子源，其用以提供一電子束，該電子源包含一注入器及一電子加速器；

一腔室，其容納經組態以將一目標固持於該電子束之一路徑中的一目標支撐結構；及

一分離元件，其用於將該腔室與該電子源分離，該分離元件包含一孔隙，該電子束通過該孔隙進入該腔室。

【第70項】

如請求項69之放射性同位素生產設備，其中該放射性同位素生產設備包含配置於該分離元件與該目標支撐結構之間的一屏蔽元件，該屏蔽元件包含一孔隙，該電子束通過該孔隙傳遞至該目標。

【第71項】

如請求項70之放射性同位素生產設備，其中該屏蔽元件之該孔隙大於該分離元件之該孔隙。

【第72項】

如請求項69至71中任一項之放射性同位素生產設備，其中該放射性同位素生產設備包含另一分離元件，該另一分離元件包含另一孔隙，該射束通過該孔隙朝向該目標傳遞。

【第73項】

如請求項72之放射性同位素生產設備，其中該另一分離元件之該另一孔隙具有與該分離元件之該孔隙相同之大小或具有與該分離元件之該孔隙不同之一大小。

【第74項】

如請求項69至71中任一項之放射性同位素生產設備，其中該放射性同位素生產設備包含一冷卻設備，該冷卻設備經配置以將一冷卻劑提供至該目標。

【第75項】

如請求項74之放射性同位素生產設備，其中該分離元件配置於該腔室中，使得允許冷卻劑通過該孔隙朝向該電子源流動。

