PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS DE CAPTURA DE NEUTRONES DE ALTA EFICIENCIA

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUD RELACIONADA

La presente solicitud reivindica el beneficio de prioridad de la solicitud de patente provisional de EE.UU. N.º 62/033.691, titulada “HIGH EFFICIENCY NEUTRON CAPTURE PRODUCT PRODUCTION”, presentada el 6 de agosto de 2014, que se incorpora en el presente documento en su totalidad por esta referencia.

CAMPO TÉCNICO

La presente divulgación se refiere a captura de neutrones y a conjuntos de reacción eficientes de neutrones y métodos. Más particularmente, la presente divulgación se refiere a producir un material nuclear, tal como un material de obtención de imágenes nuclear, mediante captura de neutrones por un material nuclear reactante.

ANTECEDENTES

En la medicina nuclear, las sustancias radiactivas se usan en el diagnóstico y procedimientos médicos terapéuticos. Radionúclidos elementales se combinan frecuentemente con otros elementos para formar compuestos químicos, o se combinan con compuestos farmacéuticos existentes para formar productos radiofarmacéuticos. Estos productos radiofarmacéuticos, una vez administrados a un paciente, pueden localizarse en órganos específicos o receptores celulares. Esta propiedad de los productos radiofarmacéuticos permite la obtención de imágenes del grado de un proceso de enfermedad en el cuerpo, basándose en la función y fisiología celulares, en vez de aquellas que se basan en cambios físicos en la anatomía del tejido. Adicionalmente, en

algunas enfermedades, los procedimientos en la medicina nuclear pueden identificar problemas médicos en una fase más temprana que otras pruebas de diagnóstico.

Un aspecto importante de la medicina nuclear es el uso de trazadores radiactivos. Un trazador radiactivo (también conocido como una marca radiactiva) es una sustancia que contiene un radioisótopo (RI) que se usa para medir la velocidad de un proceso bioquímico y para seguir el movimiento de una sustancia a través de un sistema natural tal como una célula o tejido. Un trazador radiactivo importante es el tecnecio-99m (representado simbólicamente ^{99m}Tc), que puede ser fácilmente detectado en el cuerpo por equipo de obtención de imágenes médicas.

El ^{99m}Tc es un isómero nuclear metaestable del tecnecio-99. "m" indica que éste es un isómero nuclear metaestable, cuya semivida es 6 horas. Ésta es considerablemente más larga (por muchos órdenes de magnitud) que la mayoría de los isómeros nucleares que experimentan desintegración gamma. Así, la semivida del ^{99m}Tc es muy larga en términos de desexcitación promedio, incluso corta en comparación con muchas semividas de desintegración radiactiva comúnmente observadas, y en comparación con los radionúclidos usados en muchos tipos de pruebas de medicina nuclear.

El ^{99m}Tc se usa en aplicaciones médicas de isótopos radiactivos. Es un trazador radiactivo que puede detectarse dentro del cuerpo humano por equipo de obtención de imágenes médicas. Es muy adecuado para esta función debido a que emite fácilmente fotones detectables a energías convenientes para la obtención de imágenes médicas. Adicionalmente, el ^{99m}Tc también se disuelve en agua regia, ácido nítrico y ácido sulfúrico concentrado, pero no es

soluble en ácido clorhídrico de ninguna concentración.

Los productos radiofarmacéuticos basados en ^{99m}Tc se usan para la obtención de imágenes y estudios funcionales del cerebro, hueso, miocardio, tiroides, pulmones, hígado, vesícula biliar, riñones, esqueleto, sangre y tumores.

El ^{99m}Tc se usa en aproximadamente 20 millones de procedimientos médicos de diagnóstico nuclear cada año. Aproximadamente el 85 por ciento de los procedimientos de diagnóstico por imágenes en la medicina nuclear usan este isótopo. Dependiendo del tipo de procedimiento de medicina nuclear, el ^{99m}Tc está marcado o unido a un fármaco que transporta el ^{99m}Tc a una localización prevista.

Una ventaja importante del ^{99m}Tc es que, debido a su semivida de 6,0058 horas para la emisión gamma, el 93,7 por ciento del ^{99m}Tc se desintegra a tecnecio-99 en 24 horas. Así, la corta semivida del isómero nuclear metaestable, en términos de actividad en el ser humano y metabolismo, permite procedimientos de barrido que recogen datos rápidamente pero mantienen baja exposición del paciente a radiación total. El estado fundamental del tecnecio-99 resultante, que tiene una semivida de 211.000 años que se desintegra a rutenio-99 estable, emite partículas beta suaves (electrones de origen nuclear) sin causar una significativa exposición a rayos gamma. Todas estas características garantizan que el uso de ^{99m}Tc representa carga de radiación mínima en el cuerpo, proporcionando beneficios significativos de la obtención de imágenes médicas.

Debido a su corta semivida, el ^{99m}Tc usado en medicina nuclear normalmente se extrae de generadores de ^{99m}Tc que contienen molibdeno-99

(^{99}Mo), que tiene una semivida de 2,75 días y es el núclido padre usual para el ^{99m}Tc. Desafortunadamente, una cantidad significativa del ^{99}Mo producido para el uso de médico de ^{99m}Tc procede de la fisión de uranio altamente enriquecido de solo cinco reactores en el mundo: NRU en Canadá; BR2 en Bélgica; SAFARI-1 en Sudáfrica; HFR (Petten) en Los Países Bajos; y el reactor OSIRIS de Saclay, Francia.

Un incidente de fisión única inducida conocida se representa esquemáticamente en la FIG. 1. Un neutrón 100 colisiona con un núcleo de uranio-235 (^{235}U) 102, que absorbe el neutrón 100 como se representa por el núcleo de uranio-236 104 que experimenta la fisión y que produce neutrones 106, radiación gamma 110, un núcleo de ^{99}Mo 112 (aproximadamente el 6 % de las veces), y otros productos de fisión 114. El núcleo de ^{99}Mo 112 se desintegra para producir un núcleo de ^{99m}Tc 116, y otras radiaciones 120 que incluyen una partícula beta (un electrón de origen nuclear) y antineutrinos 118.

También se produce una pequeña cantidad de ^{99}Mo a partir de uranio poco enriquecido en el nuevo reactor OPAL en Australia, además de algunos otros sitios en el mundo. Se produce una cantidad incluso más pequeña de ^{99}Mo por la activación por neutrones de molibdeno-98 usando un método de producción de neutrones basado en acelerador. Más comúnmente, una diana de uranio con ^{235}U altamente enriquecido (hasta el 90 por ciento de ^{235}U) o uranio poco enriquecido (menos del 20 por ciento de ^{235}U) se irradia con neutrones para formar ^{99}Mo como un producto de fisión, que entonces se separa de otros productos de fisión en una celda caliente.

Un proceso de activación de neutrones se muestra en la FIG. 2. En la FIG. 2, un neutrón 200 colisiona con un núcleo 202 de ^{98}Mo que absorbe el

neutrón 200 y produce un núcleo 204 de ^{99}Mo. El núcleo de ^{99}Mo 204 se desintegra entonces para producir un núcleo 206 de ^{99m}Tc y otras radiaciones 210 que incluyen un electrón (radiación beta) y antineutrinos. El generador de neutrones puede ser un acelerador de deuterio/tritio ("acelerador D-T") o puede operar usando una reacción nuclear productora de neutrones alternativa, por ejemplo, espalación.

Desafortunadamente, los actuales métodos de producción de neutrones basados en acelerador tienden a crear ^{99}Mo y ^{99m}Tc de forma poco rentable o a baja eficiencia de neutrones, con no más de algunas partículas de ^{99}Mo creadas por cada 1000 neutrones producidos. Adicionalmente, por motivos políticos y de seguridad, dos reactores nucleares viejos (NRU y HFR) se han parado repetidamente durante periodos de mantenimiento prolongados. Estos dos reactores producen una gran proporción del suministro mundial de ^{99}Mo. La escasez global resultante de ^{99m}Tc ha sugerido la necesidad de capacidad de producción adicional.

Por tanto, existe la necesidad de sistemas y métodos de uso de una fuente de neutrones para producir isótopos o radioisótopos (tales como ^{99m}Tc) a una alta eficiencia de manera que se obvie la necesidad de los actuales esquemas de producción en reactor nuclear. Más generalmente, se necesita un esquema para producir la mayoría de los isótopos sin el uso de reactores nucleares o conjuntos subcríticos.

SUMARIO

Este sumario se proporciona para introducir de una forma simplificada conceptos que se describen adicionalmente en las siguientes descripciones detalladas. Este sumario no pretende identificar características clave o

características esenciales de la materia reivindicada, ni debe interpretarse como limitante del alcance de la materia reivindicada.

Según al menos una realización, un aparato para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante incluye una pluralidad de núcleos de reactante y una pluralidad de núcleos moderadores. Los núcleos moderadores incluyen núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22. Una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico está en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones. Los núcleos de reactante incluyen molibdeno-98. La tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %. La masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 1000 kg. La masa de núcleos moderadores es al menos 1 kg. Para fines de la presente divulgación, el término conjunto subcrítico es cualquier conjunto con un factor de multiplicación de neutrones superior a 0,6 e inferior a 1.

En al menos un ejemplo, la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 5 %.

En al menos un ejemplo, se usa el control de la temperatura capaz de mantener al menos 2 regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas, y al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de 250 grados Kelvin. El control de la temperatura puede incluir el uso de un fluido criogénico.

En al menos un ejemplo, al menos un reflector de neutrones rodea al menos parcialmente las pluralidades de núcleos de reactante y núcleos moderadores. El reflector incluye núcleos moderadores. El espesor del reflector es mayor de aproximadamente 20 centímetros, y en principio puede ser ilimitadamente grueso, aunque en la práctica un reflector económicamente diseñado puede ser inferior a aproximadamente 15 metros de espesor, y más preferentemente inferior a 3 metros de espesor. Dentro de la descripción de la presente divulgación, los reflectores se describirán como entre 20 centímetros y 15 metros, con el entendimiento de que son posibles reflectores más gruesos.

En al menos un ejemplo, tanto un reflector de neutrones externo como uno interno reflejan los neutrones hacia regiones que contienen mayores densidades de núcleos de reactante. En algunas realizaciones, al menos un reflector producirá la retrodispersión de neutrones en una única colisión, mientras que en otras realizaciones son necesarias varias colisiones para producir una inversión completa o casi completa en la dirección de un movimiento del neutrón.

En al menos un ejemplo, las pluralidades están dispuestas en una o más capas aproximadamente paralelas, siendo al menos una capa distinta de otra capa basándose en la composición elemental, concentración de especies químicas, densidad o temperatura.

En al menos un ejemplo, una diana está configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas. La diana incluye átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros

transuránicos. Las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso. El canal de acceso aquí es cualquier trayectoria eficaz para que la partícula de interés entre en el aparato e impacte con una diana.

Según al menos una realización, un aparato para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante incluye una pluralidad de núcleos de reactante que tienen una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio y una pluralidad de núcleos moderadores. Para los fines de la presente divulgación, promedio en este contexto significa el promedio ponderado de todos los núcleos de interés; por ejemplo, la sección transversal microscópica promedio de 10 moléculas de agua ligera y 2 átomos de aluminio sería aproximadamente la suma de 10*2*(sección transversal de hidrógeno-1) + 10*1*(sección transversal de oxígeno-16) + 2*1*(sección transversal de aluminio-27), conjuntamente dividido entre (20+ 10 +2). Por este documento se define un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de la fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante. También se define una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en la que al menos aproximadamente el 90 % de los núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante. Para los fines de la presente divulgación, especies de núcleos en este contexto significa los núcleos de un isótopo particular, tal como

hidrógeno-2, oxígeno-16, etc.

Con el fin de interpretación, el “conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de la fuente de neutrones…” debe entenderse que implica “la configuración de fuente de neutrones que se utiliza”. Puede haber muchas formas de configurar una fuente de neutrones para alterar los isótopos dentro del conjunto de isótopos, pero la configuración particular que se usa para producir los núcleos de producto de reacción es la configuración a la que se aplican las reivindicaciones.

La masa total de núcleos moderadores es mayor de aproximadamente 1 kilogramo. Una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico está en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones.

En al menos un ejemplo, los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98, y la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %.

En al menos un ejemplo, los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98, y la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 5 %.

En al menos un ejemplo, el aparato incluye núcleos de producto de reacción de molibdeno-99 y núcleos de producto de desintegración de tecnecio-99m.

En al menos un ejemplo, los núcleos moderadores comprenden núcleos

de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

En al menos un ejemplo, el control de la temperatura se usa para mantener al menos dos regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas, y al menos región se enfría a una temperatura por debajo de aproximadamente 250 grados Kelvin. El control de la temperatura puede incluir el uso de un fluido criogénico. Al menos un reflector de neutrones puede rodear al menos parcialmente las pluralidades de núcleos de reactante y núcleos moderadores, incluyendo el reflector núcleos moderadores y que tiene un espesor que es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros. El aparato puede incluir tanto un reflector de neutrones externo como uno interno que reflejan los neutrones hacia regiones de las pluralidades que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

En al menos un ejemplo, una diana está configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas, y la diana incluye átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos. Las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

Según al menos una realización, un método de producción de núcleos de producto de desintegración a partir de un isótopo reactante usando una fuente

de neutrones incluye preparar una pluralidad de núcleos de reactante que tiene una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio y una pluralidad de núcleos moderadores. Por este documento se define un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de la fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante. También se define una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en al que al menos aproximadamente el 90 % de los núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante. La masa total de núcleos moderadores es mayor de aproximadamente 1 kilogramo. El método incluye generar neutrones e irradiar la pluralidad con los neutrones tal que se genere un producto de reacción cuando los neutrones son capturados por los núcleos de reactante. El método incluye extraer de la pluralidad un producto de desintegración que se genera por desintegración radiactiva del isótopo de producto de reacción.

En al menos un ejemplo, los neutrones se generan por un reactor nuclear o un conjunto subcrítico.

En al menos un ejemplo, los neutrones se generan por una fuente que ni es un reactor ni un conjunto subcrítico.

Los núcleos de reactante pueden incluir molibdeno-98, en cuyo caso el producto de desintegración incluye tecnecio-99m. En ese caso, la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %.

En al menos un ejemplo, los núcleos moderadores incluyen núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro- 11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

Las pluralidades de núcleos de reactante y moderadores puede estar rodeada al menos parcialmente con al menos un reflector de neutrones que incluye núcleos moderadores y cuyo espesor es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros. Tanto un reflector de neutrones externo como uno interno puede reflejar neutrones hacia regiones que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

En al menos un ejemplo, el control de la temperatura es capaz de mantener al menos 2 regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas, y al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de 250 grados Kelvin. El control de la temperatura puede usar un fluido criogénico.

En al menos un ejemplo, una diana está configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas, incluyendo la diana átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos. Las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

Según al menos una realización, un sistema para producir un producto de desintegración a partir de un reactante usando una fuente de neutrones incluye una pluralidad de núcleos de reactante, una pluralidad de núcleos moderadores y una fuente de neutrones. Los núcleos moderadores incluyen núcleos de

átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22. Los núcleos de reactante incluyen molibdeno-98. La tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %. La masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 100 kg, y la masa de núcleos moderadores es al menos 1 kg.

En al menos un ejemplo, la fuente de neutrones es un reactor nuclear o conjunto subcrítico.

En al menos un ejemplo, los neutrones se generan por una fuente que ni es un reactor ni un conjunto subcrítico.

En al menos un ejemplo, los núcleos moderadores incluyen núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro- 11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

En al menos un ejemplo, una diana está configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas. La diana incluye átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos.

Las partículas aceleradas pueden entrar en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

En al menos un ejemplo, al menos un reflector de neutrones incluye núcleos moderadores, y el reflector de neutrones rodea al menos parcialmente

las capas de las pluralidades de núcleos de reactante y moderadores. El espesor del reflector de neutrones es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros.

En al menos un ejemplo, tanto un reflector de neutrones externo como uno interno reflejan neutrones hacia regiones de las pluralidades que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

En al menos un ejemplo, el control de la temperatura es capaz de mantener al menos dos regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas, en el que al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de 250 grados Kelvin. El control de la temperatura puede incluir un fluido criogénico.

Según al menos una realización, un proceso incluye combinar una pluralidad de núcleos de reactante y una pluralidad de núcleos moderadores. Los núcleos moderadores incluyen núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio- 4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón- 22. Una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico se pone en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones. Los núcleos de reactante incluyen molibdeno-98. La tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %. La masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 100 kg, y la masa de núcleos moderadores es al menos 1 kg. La combinación se irradia con neutrones tal que se generen núcleos radiactivos de producto de reacción cuando los neutrones son capturados por

los núcleos de reactante.

En al menos un ejemplo, los núcleos de reactante incluyen molibdeno-98 y la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %. Al menos uno de los núcleos de producto de reacción y núcleos de producto de desintegración puede extraerse de la combinación irradiada. Los núcleos de producto de desintegración pueden incluir tecnecio-99m.

Según al menos una realización, un sistema para producir núcleos de producto de reacción incluye núcleos de reactante, una fuente de neutrones en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones, y el control de la temperatura capaz de refrigerar al menos 1 kg del sistema a una temperatura a o por debajo de aproximadamente 250 Kelvin.

En al menos un ejemplo, la tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %. Núcleos moderadores pueden incluir núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22. Los núcleos de reactante pueden incluir molibdeno-98.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

El sumario previo y las siguientes descripciones detalladas deben leerse en vista de los dibujos, que ilustran realizaciones y características a modo de ejemplo particulares como se describen brevemente más adelante. El sumario

y las descripciones detalladas, sin embargo, no se limitan a solo aquellas realizaciones y características explícitamente ilustradas.

La FIG. 1 ilustra un proceso de fisión inducida conocido para producir molibdeno-99 y tecnecio-99m.

La FIG. 2 ilustra un proceso de activación de neutrones conocido para producir molibdeno-99 y tecnecio-99m.

La FIG. 3 es una vista en sección transversal de un aparato para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante según al menos una realización.

La FIG. 4 es una vista en perspectiva de otro aparato para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante según al menos otra realización.

La FIG. 5 es una vista esquemática del interior del aparato de la FIG. 4.

La FIG. 6 es una vista esquemática del interior de un aparato para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante según otra realización más.

La FIG. 7 es una vista en sección transversal de un sistema para la producción de especies nucleares deseadas según todavía otra realización.

La FIG. 8 ilustra un acelerador de partículas que dirige un haz de alta energía de partículas en el sistema de la FIG. 7 según al menos una realización.

La FIG. 9 ilustra un sistema de control térmico en uso con un recipiente de envolturas en capas.

DESCRIPCIONES DETALLADAS

Estas descripciones se presentan con detalles suficientes para

proporcionar un entendimiento de una o más realizaciones particulares de materias inventivas más amplias. Estas descripciones exponen y ejemplifican características particulares de aquellas realizaciones particulares sin limitar las materias inventivas a las realizaciones y características explícitamente descritas. Consideraciones en vista de estas descripciones darán probablemente lugar a realizaciones y características adicionales y similares sin apartarse del alcance de las materias inventivas. Aunque pueden estar implicadas etapas referentes a características de procesos o métodos, no se hace implicación de ningún orden o secuencia particular entre etapas expresadas o implicadas, a menos que se establezca explícitamente un orden o secuencia.

Para promover un entendimiento de las siguientes descripciones de realizaciones a modo de ejemplo particulares, y para aclarar que el alcance completo de las descripciones se extiende más allá de cualquier realización particularmente descrita, pueden considerarse varios principios subyacentes sin imponer limitaciones a las realizaciones a modo de ejemplo. Según estos principios subyacentes, la producción de isótopos puede implementarse:

1) Usando una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico;

2) Logrando una alta probabilidad de captura de neutrones por núcleos de reactante previstos por elección de núcleos moderadores;

3) Devolviendo los neutrones escapados o fugados a una cámara de reacción por el uso de un reflector de neutrones; y/o

4) Opcionalmente usando mejora de temperatura de la captura de neutrones, preferentemente mejora de temperatura baja de la captura de

neutrones.

Es decir, pueden proporcionarse neutrones para las reacciones de captura de neutrones sin el uso de un reactor de fisión nuclear o un conjunto subcrítico, en el que material naturalmente fisible en una cantidad subcrítica o disposición se somete a algún grado de fisión inducida sin alcanzar la criticidad. Para los fines de la presente divulgación, debe entenderse que el término conjunto subcrítico implica la posibilidad de un reactor subcrítico. En las siguientes descripciones, estructuras especialmente diseñadas se implementan para hacer que los neutrones entrantes sean moderados y reflejados de tal forma que aumenten enormemente sus probabilidades de ser capturados por un núcleo de reactante previsto dado tal como molibdeno-98 (^{98}Mo). Los recipientes y alojamientos descritos a continuación están configurados, generalmente, para minimizar la fuga de neutrones y para maximizar la dispersión interna de neutrones, como una trampa de flujo, pero no en el contexto o confines de un reactor nuclear. Opcionalmente, la refrigeración de un volumen que contiene núcleos de reactante, por ejemplo usando un fluido criogénico como helio líquido, oxígeno, nitrógeno o deuterio, aumenta la probabilidad de captura de neutrones por un núcleo de reactante previsto. Para los fines de esta descripción, una cámara de reacción es cualquier volumen en el que los núcleos de reactante capturan neutrones.

Una excepción al principio 1 subyacente descrito anteriormente, encontrada en algunos de las realizaciones sucesivas, es cuando la fuente de neutrones podría ser un reactor nuclear o conjunto subcrítico. Por ejemplo, un reactor nuclear o conjunto subcrítico podría configurarse para fugar neutrones de manera que se proporcione una fuente de neutrones para algunas de las

realizaciones descritas más adelante. Por ejemplo, en una realización, un reactor nuclear o conjunto subcrítico se localiza en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones a una tasa que supera 10^7 capturas de neutrones/segundo. En estos ejemplos, la geometría de tanto el reactor nuclear como el aparato podría modificarse para facilitar el transporte de neutrones del reactor nuclear o conjunto subcrítico a los volúmenes de aparato que contienen los núcleos de reactante.

Simulaciones de modelado indican que un sistema que incluye un recipiente de 1-3 metros de diámetro (esferas y envolturas esféricas concéntricas) que implementa al menos a algún grado algunos de los principios anteriores puede producir muchos radioisótopos (“RI”) difíciles de fabricar, que incluyen ^{99}Mo, a eficiencias de neutrones que superan el actual estado de la técnica, donde la eficiencia de neutrones se define como:

Eficiencia de neutrones = (tasa de producción de núcleos de producto de reacción)/(tasa de producción de neutrones)

Para esta definición, se entiende que las tasas de producción descritas son aquellas observadas durante los periodos de operación, más específicamente durante el periodo de operación cuando los neutrones están siendo producidos. Para esta definición, también se entiende que los neutrones en la “tasa de producción de neutrones” del denominador se refieren a los neutrones inicialmente producidos (por ejemplo, por espalación nuclear, reacciones DT, de fisión) en vez de los neutrones posteriormente producidos debido a reacciones secundarias (por ejemplo, tales como de reacciones (n,xn)). Los neutrones inicialmente producidos, por ejemplo, incluirían tanto

neutrones que se originan externos al aparato y luego incidentes con el aparato, como también los neutrones producidos dentro del aparato por la acción de una reacción de partículas cargadas tal como una reacción DT o una reacción de espalación. La multiplicación de neutrones posterior, por ejemplo las reacciones (n,xn), no contribuyen a aumentar el denominador. También se entiende, para esta definición, que se considera que las tasas mencionadas en el numerador y el denominador están promediadas con respecto a intervalos de tiempo cortos, preferentemente minutos y más preferentemente segundos, en vez de con respecto a periodos de tiempo largos, tales como horas, días o más. Las tasas descritas deben considerarse en el contexto de tasas instantáneas en vez de tasas promediadas con respecto a periodos de tiempo largos tales como horas.

Las simulaciones indican que pueden lograrse valores de eficiencia de neutrones de hasta el 25 por ciento tras la implementación de una o más de las realizaciones descritas más adelante.

Podrían realizarse mayores eficiencias tras la mejora de uno o más de las realizaciones por ciertas mejoras en la geometría del reflector, temperatura y/o composición elemental. Se describen varias realizaciones de un sistema para la producción de al menos un isótopo en las siguientes descripciones detalladas y se representan en los dibujos. En al menos un de tales realizaciones, un sistema para la producción de isótopos incluye una cámara de reacción en la que están presentes núcleos de reactante, y en la que pueden estar presentes núcleos moderadores. Los neutrones para las reacciones de captura de neutrones se introducen en la cámara de reacción de una fuente de neutrones externa, o se producen localmente, por ejemplo

mediante espalación cuando una diana de espalación dentro de o cerca de la cámara de reacción es impactada por partículas aceleradas. Al menos algunos de los neutrones que inicialmente evitan las regiones de captura y escape con altas concentraciones de núcleos de reactante son posteriormente reflejados de nuevo hacia aquellas regiones, para aumentar la probabilidad de que cada neutrón sea capturado por los núcleos de reactante previstos. Disposiciones de reflectores únicos y múltiples se describen a continuación. El reflector puede tener una doble función como pared física de la cámara de reacción. El reflector puede formarse usando núcleos moderadores dentro de la cámara de reacción.

Las siguientes descripciones se refieren a núcleos de reactante, núcleos de producto de reacción, núcleos de producto de desintegración y núcleos moderadores. A menos que se establezca o implique explícitamente de otro modo, tales referencias se hacen sin consideración a si los electrones están unidos o no en capas de electrones alrededor de los núcleos. Estas descripciones se refieren, por tanto, tanto a disposiciones atómicas ionizadas como de carga equilibrada de los núcleos descritos, de forma que los núcleos descritos puedan ser aquellos de átomos sin carga, átomos ionizados, átomos libres y átomos unidos en enlaces moleculares que incluyen enlaces iónicos y covalentes. Los núcleos descritos pueden estar presentes en formas de sólido, gas, gel, líquido, u otras formas. Las especies de reactante y moderadoras pueden combinarse como mezclas desordenadas, matrices regulares y compuestos moleculares antes de la exposición a los neutrones y tales disposiciones pueden mantenerse, alterarse o perderse tras, por ejemplo, reacciones de captura de neutrones que conducen a desintegraciones

posteriores. Los núcleos de reactante pueden concentrarse en una única localización o dispersarse en todo el aparato. Los núcleos de reactante pueden, si están en forma sólida, concentrarse en una o más pastillas, o en láminas con grandes áreas superficiales, o en otras formas. Los núcleos de reactante pueden estar en disolución dentro de un disolvente, o pueden ser un componente en un líquido, o pueden estar en forma gaseosa.

Un aparato 300 para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante se muestra en vista en sección transversal en la FIG. 3. El aparato 300 formado en vista en sección transversal como un sector circular define una cámara de reacción 304. Las paredes laterales radiales 306 divergen de una pared de extremo proximal 310 a una pared de extremo distal 312 de forma que la cámara 304 se expande de la pared de extremo proximal a distal. Un canal de acceso 314 formado a través de la pared de extremo proximal 310 permite que los neutrones entren en la cámara de reacción 304 de una fuente de neutrones 316, que en la realización ilustrada no es un reactor nuclear o un conjunto subcrítico. La fuente de neutrones 316 está en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones. El elemento 318 en la FIG. 3 representa un canal o proceso por el que, por ejemplo, reactantes, productos u otras especies químicas o nucleares, entran en o se extraen de la cámara 304.

Las paredes de la cámara de reacción o cámaras sirven opcionalmente de reflectores de neutrones, rodeando la cámara de reacción 304, devolviendo al menos algunos de los neutrones que llegan y/o entran en las paredes a la cámara de reacción 304 para aumentar la probabilidad de que cada neutrón sea capturado por los núcleos de reactante previstos. Las paredes incluyen

núcleos moderadores, de forma que las paredes están compuestas de material de relación de moderación alta que tienen una sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica baja. Por ejemplo, las paredes pueden incluir berilio y/o carbono. Las paredes, en términos de espesor, en al menos una realización, son mayores de aproximadamente 20 centímetros e inferiores a aproximadamente 15 metros.

Dentro de la cámara de reacción 304, los neutrones 320 son preferentemente capturados por núcleos de reactante 322 para producir los núcleos de producto de reacción 324 deseados. Los núcleos moderadores 326 también están presentes en la cámara de reacción 304 en la realización ilustrada, sirviendo los núcleos moderadores también opcionalmente de núcleos reflectantes. Un espesor suficiente de núcleos reflectantes también puede servir de reflector en una variedad de realizaciones geométricas.

En al menos una realización, la pluralidad de núcleos de reactante 322 tiene una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio. También incluido y definido por este documento es un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de la fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante. También se define una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en la que al menos aproximadamente el 90 % de los núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante.

En al menos una realización, la masa total de núcleos moderadores es

mayor de aproximadamente 1 kilogramo. En al menos una realización, el aparato 300 incluye el control de la temperatura capaz de refrigerar al menos 0,1 kg del sistema a una temperatura de o por debajo de aproximadamente 250 grados Kelvin.

En al menos una realización, los núcleos de reactante 322 incluyen núcleos de molibdeno-98, y la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %. En al menos una realización, la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 5 %.

En al menos una realización, los núcleos de producto de reacción 324 incluyen núcleos de molibdeno-99 producidos de núcleos de molibdeno-98 de producto de reacción 324 por reacciones de captura de neutrones. Debido a la desintegración de núcleos de molibdeno-99, también puede estar presentes núcleos de producto de desintegración de tecnecio-99m.

En al menos una realización, los núcleos moderadores 326 incluyen núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

La fuente de neutrones 316 representa esquemáticamente muchos tipos de fuentes de neutrones que no son reactores nucleares o conjuntos subcríticos. Ejemplos adecuados incluyen emisores de neutrones, generadores de neutrones y dispositivos de producción de neutrones. En al menos una realización, la fuente de neutrones 316 ilustrada representa un generador de neutrones con una emisión de neutrones que es mayor de 1×10^{14} neutrones

por segundo. El generador de neutrones puede incluir un acelerador de protones, deuterones o ión helio con una energía de proyectiles superior a 8 MeV (mucho más baja para reacciones productoras de neutrones DT) y corriente del haz normalmente en el intervalo de un miliamperio o más alta, aunque pueden diseñarse sistemas con corriente del haz en el intervalo de microamperios a cientos de microamperios. Así, en diversas realizaciones, los neutrones 320 se proporcionan por la fuente de neutrones 316, y los neutrones irradian los núcleos de reactante 322 de forma que los núcleos de producto de reacción 324 se generen cuando los neutrones 320 son capturados por los núcleos de reactante 322.

El sistema 300 en al menos una realización se utiliza para producir una especie nuclear particular en un proceso escalonado que incluye captura de neutrones inducida, seguida de una o más etapas de desintegración radiactiva que producen la producción de las especies nucleares particulares. En al menos un ejemplo, los núcleos de reactante 322 se exponen a neutrones 320 para producir, mediante la captura de neutrones, núcleos de producto de reacción 324. Las desintegraciones radiactivas naturales de los núcleos de producto de reacción 324 producen entonces posteriormente núcleos de producto de desintegración 328 de una especie nuclear particular deseada. En un ejemplo particular, los núcleos de reactante 322 en la FIG. 3 representan núcleos de ^{98}Mo que capturan neutrones 320 para producir núcleos de ^{99}Mo, que se representan mediante núcleos de producto de reacción 324. Continuando ese ejemplo particular, los núcleos de producto de desintegración 328 representan una especie nuclear deseada, ^{99m}Tc, producida por la desintegración radiactiva de ^{99}Mo. Debe entenderse que la FIG. 3 representa

muchos otros ejemplos particulares en los que una especie nuclear deseada se puebla en una cadena de desintegración en la que se producen una o más desintegraciones radiactivas siguiendo la producción de los núcleos de producto de reacción 324 por reacciones de captura de neutrones inducidas irradiando núcleos de reactante 322 con neutrones 320. Mientras que ^{99}Mo produce ^{99m}Tc en una única etapa de desintegración radiactiva tras la captura de neutrones por ^{98}Mo, estas descripciones también se refieren a diversas otras secuencias de desintegración en las que se producen múltiples etapas de desintegración.

Generalmente, pueden usarse diversos disolventes o fluidos en los que el isótopo reactante de ^{98}Mo 322 puede disolverse o suspenderse como moderador 326 o una parte del mismo, en tanto que los átomos dentro de cada constituyente de disolvente o fluido tengan una sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica baja con respecto a la del reactante de ^{98}Mo 322. Generalmente, estos disolventes o fluidos pueden estar compuestos de elementos como hidrógeno, helio, berilio, carbono, oxígeno, flúor, y algunos isótopos de otros elementos. El reactante de ^{98}Mo 322 puede suspenderse o disolverse tanto en forma regular como líquida en estos disolventes o fluidos.

Por ejemplo, la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de ^{98}Mo del reactante 322 es muy superior a la sección transversal de neutrones térmicos microscópica de núcleos de óxido de deuterio 332 en líquido. Como un ejemplo, la sección transversal de neutrones térmicos microscópica del reactante de ^{98}Mo 322 es aproximadamente 130 milibarnios frente a menos de un milibarnio para cualquiera de aquellos de los dos átomos de hidrógeno o uno de oxígeno. Como tal, la probabilidad por

núcleo de un neutrón 320 que es capturado por el núcleo reactante de ^{98}Mo 322 es muy superior a la probabilidad de que un neutrón sea capturado por óxido de deuterio. Una vez un neutrón 320 es capturado por el núcleo de reactante de ^{98}Mo 322, forma el producto de reacción de ^{99}Mo 324. El producto de reacción de ^{99}Mo 324 se desintegra entonces para crear el producto de desintegración de ^{99m}Tc 328, que puede ser directamente y continuamente extraído de la cámara 304 mediante un canal 318, que puede incluir una válvula u otras estructuras mecánicas y químicas previstas para realizar la separación radioquímica para aislar la reacción deseada o producto de desintegración.

Alternativamente, en lugar de suspender o disolver el reactante de ^{98}Mo 322 en un líquido o fluido separado, el reactante de ^{98}Mo 322 puede él mismo ser parte de un compuesto líquido. Ejemplos no limitantes incluyen: difluoromolibdeno ($^{98}MoF_2$); fluoruro de molibdeno ($^{98}MoF_3$); tetrafluoruro de molibdeno ($^{98}MoF_4$); hexafluoruro de molibdeno ($^{98}MoF_6$); compuestos de molibdeno, oxígeno y/o flúor (MoO_nF_m).

Generalmente, el aparato 300 dirige los neutrones 320 en un volumen donde los neutrones son capturados por ^{98}Mo en lugar de por otros núcleos, en una relación que es significativamente superior a en sistemas que carecen de termalización fuerte y/o altas relaciones de moderación, aún cuando el ^{98}Mo tenga una sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica baja en aislamiento (de aproximadamente 130 milibarnios). Como tal, el aparato 300 permite que los neutrones 320 emitidos de la fuente de neutrones sean capturados por los núcleos de reactante deseados sin que la mayoría de los neutrones 320 se fuguen o sean capturados por núcleos distintos de ^{98}Mo, y

así se desperdicien. El resultado es que la eficiencia de capturar neutrones sobre los núcleos de reactante deseados en el aparato 300 es alta (entre el 1 y el 30 %) y generalmente se describe por la siguiente relación previamente descrita:

Eficiencia de neutrones = (tasa de producción de núcleos de producto de reacción)/(tasa de producción de neutrones)

donde los núcleos de producto de reacción son ^{99}Mo en situaciones donde los núcleos de reactante comprenden ^{98}Mo. Sin embargo, ciertos modelos han mostrado que alterando la temperatura de los núcleos de reactante, pueden obtenerse eficiencias más altas del 30 %.

Un sistema 400 para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante según al menos una realización se representa en las FIG. 4-5. El sistema incluye una pared esférica 402. Un canal de acceso 404 definido a través de la pared 402 permite el acceso para las partículas aceleradas a un diana esférica central 406. Una cámara de reacción en forma de envoltura esférica 410 (FIG. 5) rodea al menos parcialmente la diana 406. La cámara de alrededor puede rodear la diana concéntricamente. La diana 406 está configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas que llegan a la diana a través del canal de acceso 404. La diana 406 puede construirse de materiales tales como deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos. El canal de acceso se configuró para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

Al igual que las paredes de la cámara de reacción 304 de la FIG. 3, la

pared 402 de las FIG. 4-5 sirve de reflector de neutrones, rodeando la cámara de reacción 410 y devolviendo al menos algunos de los neutrones que llegan a la pared a la cámara de reacción 410, que contiene mayores densidades de núcleos de reactante, para aumentar la probabilidad de que cada neutrón sea capturado por núcleos de reactante. La pared incluye núcleos moderadores, de forma que la pared está compuesta por material de relación de moderación alta que tiene una sección transversal de captura de neutrones baja. Por ejemplo, la pared 402 puede incluir berilio y/o carbono. La pared en términos de espesor, en al menos una realización, es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros. En algunas realizaciones, se usan valores de espesor entre uno y tres metros.

En la realización ilustrada, el canal de acceso 404 se define por una pared tubular que se extiende radialmente 412 que conecta una superficie externa 414 de la pared del recipiente 402 con la diana 406. Como se muestra en la FIG. 5, la cámara de reacción en forma de envoltura esférica 410 se aísla del canal de acceso 404 por la diana esférica 406 y la pared tubular que se extiende radialmente 412. La carcasa esférica 400 también puede incluir un canal 416 para extraer directamente productos de reacción o de desintegración de la cámara de reacción 410. El canal 416 puede incluir una válvula y otras estructuras mecánicas similares.

Un acelerador de partículas 420 dirige un haz de alta energía 422 de partículas en el canal de acceso 404 del sistema 400 (FIG. 7.) La diana 406 dentro de la trayectoria del haz 422 produce neutrones a medida que el haz de partículas golpea la diana. El acelerador de partículas 420 puede proporcionar, por ejemplo, un haz de alta energía de protones, deuterones, tritones, helio, u

otras partículas. El acelerador de partículas 420 y la diana 406 constituyen juntos una fuente de neutrones que ni es un reactor ni un conjunto subcrítico.

En al menos una realización, los neutrones producidos en la diana 406 son emitidos de una forma completamente o parcialmente isotrópica. Así, el poner la diana emisora de neutrones en el centro de la cámara de reacción aproximadamente esférica facilita una distribución relativamente uniforme de neutrones en ese volumen de la cámara de reacción 410 donde núcleos de reactante previstos esperan a los núcleos emitidos. Sin embargo, en realizaciones donde se proporcionan neutrones o se emiten anisotrópicamente o direccionalmente, la diana 406 puede construirse y colocarse, por ejemplo no concéntricamente con la pared 402, en cualquier localización dentro de o con respecto a la cámara de reacción 410 para maximizar la eficiencia de neutrones con respecto a la captura por núcleos de reactante previstos en la cámara.

Dentro de la cámara de reacción 410 (FIG. 5), como ya se ha descrito con referencia a la cámara de reacción 304 de la FIG. 3, los neutrones 320 son capturados por núcleos de reactante 322 para producir núcleos de producto de reacción 324 deseados. Como tales, los núcleos de producto de reacción 324 pueden incluir núcleos de molibdeno-99 producidos de núcleos de producto de reacción de molibdeno-98 324 por reacciones de captura de neutrones. Debido a la desintegración de los núcleos de molibdeno-99, también pueden estar presentes núcleos de producto de desintegración de tecnecio-99m 328. También pueden estar presentes núcleos moderadores 326 en la cámara de reacción 410, sirviendo los núcleos moderadores también opcionalmente de núcleos reflectores. En al menos una realización, y como ya se ha descrito con

referencia a la FIG. 3, los núcleos moderadores 326 incluyen núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

Un sistema 500 para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante según al menos otra realización se representa en la FIG. 6. El sistema 500 se diferencia del sistema 400 de la FIG. 5 en que se usa una fuente de neutrones 424 en vez del acelerador 420 y la diana 406. En la FIG. 6, se define una cámara central 408 dentro de la cámara de reacción 410 para recibir la fuente de neutrones 424 a través del canal de acceso 404. La fuente de neutrones 424 puede ser un dispositivo generador de neutrones capaz de emitir neutrones en un modo isotrópico, o una fuente de desintegración radiactiva que emite neutrones, tal como californio-252. El sistema 500 es por lo demás similar al sistema 400 a tal grado que las descripciones anteriores con referencia a la FIG. 5 también son aplicables a la FIG. 6, particularmente donde números de referencia similares se refieren a elementos similares.

En un ejemplo operacional que se refiere a las FIG. 3, 5 y 6, el reactante 322 previsto para la captura de neutrones es ^{98}Mo, el producto de reacción 324 es ^{99}Mo y el isótopo de producto de desintegración es ^{99m}Tc. Los neutrones 320 se emiten en la cámara de reacción 410. Cuando un neutrón 320 se captura por un núcleo reactante de ^{98}Mo 322, se produce un núcleo de producto de reacción de ^{99}Mo 324. El núcleo de producto de reacción de ^{99}Mo 324 se desintegra por último lugar para formar un núcleo de producto de desintegración de ^{99m}Tc 328 mediante desintegración beta. En este ejemplo, los núcleos de reactante 322 y los núcleos moderadores 326 pueden estar presentes en un líquido, gas o gel como ejemplos no limitantes.

En este ejemplo operacional, el reactante de ^{98}Mo 322 puede combinarse con el moderador 326 en una disolución, o suspensión. Los núcleos moderadores 326 pueden incluir deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22 como ejemplos no limitantes. Ejemplos de moderadores adicionales incluyen compuestos deuterados tales como óxido de deuterio (D_2O), peróxido de hidrógeno deuterado (D_2O_2) y compuestos orgánicos deuterados ($D_nC_mO_p$). Otros ejemplos de moderadores incluyen oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), metanol deuterado, etanol deuterado y flúor.

Pueden usarse diversos disolventes o fluidos en los que el reactante de ^{98}Mo puede suspenderse en tanto que los constituyentes de disolvente o fluido tengan una sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica baja con respecto al reactante de ^{98}Mo. Generalmente, estos disolventes o fluidos pueden estar compuestos de elementos como hidrógeno, helio, carbono, oxígeno, flúor, y algunos isótopos de otros elementos. El reactante de ^{98}Mo puede suspenderse o disolverse en estos fluidos o disolventes.

Alternativamente, en lugar de suspender o disolver el reactante de ^{98}Mo en un líquido o fluido separado, el reactante de ^{98}Mo puede ser un constituyente de un compuesto líquido o sólido tal como, para ejemplos no limitantes, difluoromolibdeno, fluoruro de molibdeno, tetrafluoruro de molibdeno, hexafluoruro de molibdeno, óxidos de molibdeno, y compuestos de molibdeno, oxígeno y flúor (MoO_nF_m).

Los núcleos de producto de desintegración o de producto de reacción pueden ser directamente y continuamente extraídos de la cámara de reacción mediante el elemento 318 (FIG. 3) o el canal 416 (FIGS. 5 y 6), cada uno de los

cuales puede incluir una válvula u otras estructuras mecánicas y químicas previstas para realizar la separación radioquímica para aislar el producto deseado.

El procesamiento puede avanzar continuamente o en modo discontinuo.

Un sistema 700 para la producción de especies nucleares deseadas se representa en la FIG. 7 según al menos una realización. El sistema 700 incluye un conjunto al menos parcialmente esférico dentro de una pared externa 702. El sistema 700 está soportado por una base 704, representada como un pedestal trapezoidal para fines a modo de ejemplo. La base 704 soporta el peso del sistema 700 sin interferir con la operación práctica. Dentro de la pared externa 702, múltiples capas de envoltura esféricas rodean una diana central 706 en una disposición concéntrica. La diana central 706 emite neutrones cuando un haz 750 de partículas incide sobre la diana. Los neutrones son emitidos en las capas de envoltura esféricas que rodean la diana central 706, pasando al menos algunos de los neutrones de la capa más interna 710 a capas más externas. Al menos una de las capas de envoltura esféricas sirve de volumen de reacción de captura de neutrones, que tiene núcleos previstos para reacciones de captura de neutrones presentes. Otras capas sirven de capas moderadoras y/o reflectoras para aumentar la probabilidad de que los neutrones emitidos de la diana central 706 sean capturados por núcleos previstos.

Aunque se ilustran cinco capas de envoltura esféricas en la FIG. 7, estas descripciones se refieren a estructuras en capas que tienen menos de y más de cinco capas de envoltura esféricas. Para fines del ejemplo, las capas de la cámara de reacción de envoltura esférica ilustradas en la FIG. 7 se describen

en el presente documento, en tamaño radial creciente desde la diana esférica central 706 hasta la pared externa 702, como: una primera capa 710; una segunda capa 712; una tercer capa 714; una cuarta capa 716; y una quinta capa 718, en la que su orden numerado se corresponde con sus posiciones radialmente ordenadas en la estructura en capas. En al menos una realización, la diana esférica central está sustituida por una cámara que define una capa más interna.

Al igual que las paredes de la cámara de reacción 304 de la FIG. 3, la pared 702 de las FIG. 7 puede servir de reflector de neutrones, rodeando las cámaras de reacción y reflejando al menos algunos de los neutrones que llegan a la pared para aumentar la probabilidad de que cada neutrón sea capturado por un núcleo de reactante previsto. La pared incluye núcleos moderadores, de forma que la pared está compuesta por material de relación de moderación alta que tiene una sección transversal de captura de neutrones baja. Por ejemplo, la pared 702 puede incluir berilio, oxígeno y/o carbono.

Pueden estar presentes núcleos moderadores en las capas de envoltura esféricas interiores a las paredes de la cámara de reacción, y estos núcleos moderadores pueden también servir de reflectores de neutrones. La pared en términos de espesor, en al menos una realización, es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros. Espesores próximos a 1-2 metros se usan en algunas realizaciones.

En la FIG. 7, se ilustran cuatro límites radialmente intermedios esféricos en sección transversal como: un primer límite 720 entre la primera capa 710 y la segunda capa 712; un segundo límite 722 entre la segunda capa 712 y la tercera capa 714; un tercer límite 724 entre la tercera capa 714 y la cuarta capa

716; y un cuarto límite 726 entre la cuarta capa 716 y la quinta capa 718.

Los límites esféricos representan, en diversas realizaciones, cualquiera de: materiales estructurales que soportan y separan las capas adyacentes; o la interfase donde las capas cumplen sin materiales estructurales adicionales mantener su separación. Es decir, la diana esférica central 706 y las capas ordenadas 710, 712, 714, 716 y 718 son distintas en diversas realizaciones por sus posiciones, contenidos y otras propiedades físicas tales como temperaturas con o sin material intermedio entre ellas en los límites radialmente intermedios. Pueden usarse miembros estructurales adicionales para conectar y/o soportar cada capa y límite. Haces radialmente dispuestos 730 a modo de ejemplo, que se extienden como radios, se ilustran en la FIG. 7 como interconectando los límites 720, 722, 724 y 726.

Los materiales estructurales por los que pueden construirse los límites esféricos, en al menos una realización del sistema 700 de la FIG. 7, incluyen materiales de sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica baja. Por ejemplo, puede usarse carburo de silicio, carburo de berilio, carbono y circonio. El espesor óptimo para las capas de material estructural y sus composiciones varían entre realizaciones. Las capas estructurales en diversas realizaciones son lo suficientemente gruesas como para conferir estabilidad, pero no tan gruesas como para capturar excesivamente neutrones y reducir la eficiencia de neutrones. En algunas realizaciones, pueden usarse materiales estructurales con secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas promedio inferiores a 300 milibarnios, tales como circonio. En otras realizaciones, pueden usarse materiales estructurales con secciones transversales de captura de

neutrones térmicos microscópicas promedio inferiores a 30 milibarnios, tales como polímeros o plásticos que contienen carbono, deuterio y oxígeno. En algunas realizaciones, materiales que proporcionan soporte estructural pueden hacer también de núcleos moderadores.

Tras la emisión de neutrones de la diana 706, se producen procesos de captura de neutrones entre la diana y una pared externa 702 del sistema 700 dentro de una o más de las capas circundantes 710, 712, 714, 716 y 718 para facilitar la producción de una especie nuclear deseada. La pared externa 702 se ilustra como un límite esférico por comodidad, pero puede tomar otra forma en algunas realizaciones.

Un canal de acceso 732 se representa como una perforación cónica que disminuye en tamaño desde la pared externa 702 hacia la diana esférica central 706. El canal de acceso 732 permite que un haz 750 de partículas llegue a la diana 706. Una pared que se extiende radialmente 734 que define el canal de acceso 732 se ilustra en la FIG. 7 como cónicamente formada para coincidir con la perforación cónica a través de la estructura en capas. En diversos otros ejemplos, la pared 734 y la perforación tienen otras formas, por ejemplo formas cilíndricas de correspondencia sin conicidad, para definir el canal de acceso 732. La pared que se extiende radialmente 734 en al menos una realización conecta la pared externa 702 con la diana central 706, aislando las capas 710, 712, 714, 716 y 718 entre sí, y del exterior de la pared externa 702, mientras que se permite el acceso a la diana central 706.

El canal de acceso 732 se ilustra como el ángulo sólido subtenido s 736, que se muestra como un ángulo agudo para un fin ilustrativo a modo de ejemplo. En otras realizaciones, el ángulo 736 es obtuso. En al menos una

realización, el ángulo sólido 736 es aproximadamente 2π estereorradianes de forma que las capas 710-718 son semiesféricas. Así, en diversas realizaciones, el ángulo sólido 730 puede ser de cualquier valor y el canal de acceso 732 puede ser de cualquier tamaño y forma.

El canal de acceso 732 puede servir a dos o más fines. Permite que un haz de partículas llegue al centro del sistema 700, donde partículas entrantes tales como protones, deuterones, núcleos de helio, y otros proyectiles, pueden producir neutrones, por ejemplo induciendo reacciones nucleares en una diana central. Por ejemplo, si se usa berilio como la diana central 706, las partículas entrantes de alta energía como los protones pueden producir neutrones por una reacción ^{9}Be(p,n). El canal de acceso 732 también permite la entrada y salida de fluido de refrigeración para controlar la temperatura en las capas del sistema 700. Por ejemplo, podrían usarse helio líquido, oxígeno y/u otros refrigerantes para mantener las temperaturas de la diana esférica central 706 y las capas 710-718, cada una a una temperatura respectiva particular. En algunas realizaciones del sistema 700, las temperaturas se mantienen para controlar preferencialmente la relación de moderación y/o para aumentar la sección transversal de captura de neutrones microscópica de un isótopo de reactante deseado. En algunas realizaciones, las temperaturas se reducen en algunas capas a menos de 100 grados K (-173,15 ºC), e incluso a tan solo el punto de ebullición del helio, e incluso más bajas todavía.

Uno o ambos de estos fines descritos podrían proporcionarse por el canal de acceso 732 en diversas realizaciones. Por ejemplo, un mecanismo de generación de neutrones podría estar completamente contenido dentro del recipiente, y puede o puede no necesitarse refrigeración o calentamiento.

Además, puede estar presente más de una perforación. Las formas, tamaños, localizaciones y números de perforaciones pueden variar sin cambiar los principios anteriores. Algunas realizaciones podrían no usar ninguna perforación.

En al menos una realización, la diana emisora de neutrones comprende al menos 10 gramos de núcleos que poseen una sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica superior a la de los núcleos de reactante, en un volumen donde la energía de los neutrones es muy superior a la energía térmica. En al menos una realización, la diana emisora de neutrones comprende al menos 10 gramos de núcleos que poseen una sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica superior a la de los núcleos de reactante, y donde la diana emisora de neutrones está configurada (por ejemplo geométricamente, térmicamente) para absorber tan pocos neutrones como sea posible, por ejemplo menos del 1, 5 o 10 % de todos los neutrones producidos en la diana.

En al menos una realización, un haz externamente administrado 750 de partículas entra en el canal de acceso para crear neutrones mediante las reacciones nucleares en la diana 706. En otro ejemplo, una fuente de desintegración RI de neutrones se coloca en la localización diana, por ejemplo AmBe, ^{252}Cf, PuBe, y pueden usarse otras fuentes.

Debido a que el sistema se diseña para moderar neutrones de incluso alta energía (por ejemplo, incluso superior a 8-14 MeV), el sistema puede manipular una amplia variedad de entrada de energía de neutrones sin pérdida de función. Por ejemplo, pueden usarse neutrones DT y las fuentes de espalación. También son aceptables diversas intensidades de neutrones o tasas de

entrada. Un principio de diseño subyacente implementado por una o más realizaciones descritas en el presente documento se refiere a aumentar la probabilidad de que un neutrón cualquiera sea capturado por un reactante previsto dado. Como resultado, la intensidad de los neutrones administrada en el recipiente no debe variar enormemente la eficiencia de neutrones promedio.

Ya existen aceleradores comerciales, por ejemplo, aquellos que pueden alcanzar las energías y haces de corriente necesarios para producir estas intensidades de neutrones. Por ejemplo, partículas que incluyen protones, deuterio, tritio, helio, y otros ejemplos, cuando inciden con una diana productora de neutrones, pueden producir entre 0,1 y 5 neutrones por partícula incidente a energías de décimos a algunos cientos de MeV. Diferentes dianas dan diferentes rendimientos de neutrones en un proceso llamado espalación nuclear.

En al menos un ejemplo, un haz de partículas de alta energía (décimos a cientos de MeV) son incidentes sobre la diana rica en neutrones, generando neutrones suficientes para la operación práctica. Suponiendo que se genera aproximadamente un neutrón por partícula nuclear incidente, es necesario un haz de aproximadamente 10^{16} partículas por segundo, o algunos miliamperios de corriente de haz. Los haces que pueden proporcionar algunos décimos o cientos de MeV a corrientes de haz de miliamperios o más altas están disponibles en las implementaciones de investigación en la industria, por ejemplo en la terapia con protones. Pueden garantizarse energías de haces y corrientes de haces más altas o más bajas para reducir el coste o para cambiar la tasa de producción con el tiempo para alterar la tasa de calentamiento de la diana productora de neutrones, por ejemplo debido a calentamiento a medida

que se deceleran las partículas de alta energía, en las que algunas colisiones generan calor en lugar de (o además de) neutrones.

En la FIG. 8, un acelerador de partículas 800 dirige un haz de alta energía 802 de partículas en el canal de acceso 732 del sistema 700 (FIG. 7.) En la FIG. 8, solo la diana esférica central 706 se ilustra explícitamente para representar la estructura de envoltura en capas ilustrada más explícitamente en la FIG. 7. Como sucede con la FIG. 7, la FIG. 8 representa estructuras en capas que tienen cualquier número de capas de envoltura aproximadamente esféricas. La FIG. 8 ilustra una configuración en la que un núclido de reactante previsto puede estar presente en cualquiera o todas las capas, y adicionalmente puede servir de material estructural. Los núcleos diana 804 dentro de la trayectoria del haz 802 producen neutrones 806 a medida que golpean las partículas del haz. En esta representación en diagrama, un acelerador de partículas 800, que emite, por ejemplo, protones, deuterones, tritones, helio, u otras partículas, hace que un haz de alta energía de partículas incidentes o núcleos que entran en el sistema 700 a través del canal de acceso 732 golpee la diana 804, haciendo que se emitan neutrones 806. Las FIG. 7-8 representan muchas configuraciones de materiales y geometrías que se caracterizan por un volumen de relación de moderación alto dentro del sistema 700. Las disposiciones representadas pueden variarse dentro del alcance de estas descripciones sin comprometer la alta eficiencia de neutrones.

Muchas formas de producción de neutrones según realizaciones dentro del alcance de estas descripciones producen neutrones que van a emitirse de un modo principalmente o parcialmente isotrópico. El poner la diana emisora de neutrones próxima al centro del volumen puede ayudar a distribuir neutrones

isotrópicamente emitidos uniformemente en zonas ricas con núcleos previstos para la captura de neutrones para ayudar a maximizar la eficiencia de neutrones. Alternativamente, en situaciones con anisotropía en la emisión de neutrones, pueden variarse la localización y la forma del emisor de neutrones o seleccionarse óptimamente para mejorar la eficiencia de neutrones.

Se proporciona calentamiento y/o refrigeración en diversas realizaciones para mantener una diana productora de neutrones a una temperatura estable seleccionada. Puede usarse refrigeración para facilitar el potenciamiento de la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante reduciendo la energía de los neutrones y así mejorando la sección transversal de captura de neutrones microscópica de los núcleos de reactante previstos, tales como núcleos de ^{98}Mo. La refrigeración puede incluir refrigeración criogénica. También puede usarse calentamiento para reducir la captura de neutrones de núcleos no de reactante aumentando la energía de los neutrones. El refrigerante y cualquier tubería, canalización y tubería de revestimiento que lleve el refrigerante dentro de los alojamientos descritos en el presente documento también tienen preferentemente secciones transversales de captura de neutrones microscópicas pequeñas, pero son capaces de manipular temperatura más fría que la ambiente o temperaturas criogénicas sin comprometer la integridad funcional. Los materiales de las tuberías pueden incluir, por ejemplo: cualquier polímero construido con carbono, deuterio, oxígeno, berilio, flúor, y otros materiales de sección transversal de captura de neutrones microscópica baja; o metales como, por ejemplo, circonio. Debe aplicarse refrigerante suficiente para eliminar el calor residual creado durante la creación de neutrones, y también para enfriar cualquier capa del volumen hasta temperaturas por debajo de la

temperatura ambiente, por ejemplo, hasta 100 grados K (-173,15 ºC), 30 grados K (-243,15 ºC), 10 grados K (-263,15 ºC), o por debajo del punto de ebullición del helio. En algunas realizaciones, también podría emplearse el uso deliberado de calentamiento para elevar las temperaturas por encima de la temperatura ambiente con el fin de aumentar la energía de los neutrones y así reducir las secciones transversales de captura de neutrones microscópicas.

El material estructural usado en las construcciones debe ser capaz de operar a temperatura más baja de la ambiente y temperaturas criogénicas, y también a resistir ciclos de temperatura entre temperatura ambiente y temperatura más baja de la ambiente o temperatura criogénica, si se usan temperaturas más bajas. El refrigerante, si se usa, puede entrar y abandonar volúmenes interiores en más de un sitio. Por ejemplo, además de entrar y/o salir en la perforación, el refrigerante podría entrar en o abandonar diversos conductos. Pueden usarse variantes de la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica especialmente bajas de materiales estructurales comercialmente disponibles, tuberías, componentes electrónicos, intercambiadores de calor, etc., o fabricarse específicamente para su uso en este aparato.

En la FIG. 9, se representa un sistema de control térmico 900 a modo de ejemplo para su uso con un recipiente de envoltura en capas 902 que representa estructuras en capas que tienen cualquier número de capas de envoltura esféricas 904 concéntricamente dispuestas alrededor de una diana esférica central o cavidad 906. Un haz de alta energía 910 entra en el recipiente 902 a través de una perforación 912 y un núcleo de diana 914 dentro de la trayectoria del haz 910 produce neutrones a medida que las partículas del

haz golpean la diana. La FIG. 9 ilustra una configuración en la que un núclido de reactante previsto puede estar presente en cualquiera o todas las capas, y así representa esquemáticamente implementaciones térmicamente mantenidas de al menos los sistemas ilustrados en las FIG. 5 y 7-8.

El sistema de control térmico 900 incluye cualquier número de conductos primarios 920 y sub-conductos 922 y 924 que definen trayectorias de fluido de envío y retorno que constituyen una red de distribución de fluido ramificada implementada en la estructura en capas del recipiente de envoltura en capas 902 de forma que las capas de envoltura 904 puedan ser mantenidas térmicamente independientemente o juntas. En al menos una realización, se usa un productor de fluido criogénico 926 convencional para recircular fluido refrigerante de sección transversal de captura de neutrones microscópica baja que está suficientemente libre de contaminantes de sección transversal de captura de neutrones microscópico más alta. En otra realización, el fluido de refrigeración se usa para mantener los núcleos de reactante entre 200 y 250 K (-73,15 a -23,15 ºC). La refrigeración, tanto criogénica como de otro modo, debe hacerse de tal forma que no interfiera con el haz 910 que entra en la perforación.

Particularmente dentro del recipiente 902, las líneas de conductos, tubos, recintos y el refrigerante distribuido deben tener secciones transversales de captura de neutrones microscópicas bajas para minimizar los neutrones que son capturados por el material dentro del recipiente distintos del reactante previsto. Diversos sistemas de refrigeración y disposiciones que cumplen estas condiciones están dentro del alcance de estas descripciones, ya que son diversos métodos de temperatura más baja de la ambiente o suministro,

almacenamiento y producción de fluido criogénico.

En algunas realizaciones, la eliminación de un radioisótopo producido puede avanzar permitiendo que las diversas capas se enfríen o calienten hasta temperatura ambiente naturalmente, o puede producirse eliminando material congelado, si el material está presente en forma congelada (por ejemplo ^{98}Mo o ^{99}Mo en D_2O sólido, oxígeno, nitrógeno-15, etc.). La eliminación también puede implicar permitir que se evapore líquido, dejando solo Mo, por ejemplo de Mo en oxígeno líquido o helio.

En algunas realizaciones, para extraer y transportar radioisótopos tales como ^{99}Mo, pueden seguirse los métodos radioquímicos existentes y procedimientos de suministro en cadena existentes o modificados. En situaciones donde el ^{99}Mo no pueda ser fácilmente extraído del precursor de ^{98}Mo o donde tal extracción no esté garantizada o sea necesaria, la masa de Mo puede transportarse junta, usarse en generadores de tecnecio-99m comercialmente disponibles hoy en día, y devolverse para extraer el molibdeno para la reutilización. En algunas realizaciones, pueden usarse generadores de tecnecio-99m alterados o mejorados que pueden usar satisfactoriamente niveles de radiactividad específica más baja que aquellos usados por los actuales generadores de tecnecio del estado de la técnica comerciales. Debido a que el uso de molibdeno enriquecido es útil para la operación de neutrones de alta eficiencia, podría ser deseable usar un método de transporte y devolución del recipiente que minimizara la perdida de ^{98}Mo enriquecido (caro). Aparatos según estas descripciones se construyen de tal forma que la eliminación o adición de material de núcleos de reactante, tal como ^{98}Mo, sea rápida y fácil. Por ejemplo, puede construirse de tal forma que la capa o capas

que contienen material de núcleos de reactante sean fácilmente eliminadas, bombeadas o se vuelvan a añadir.

El volumen o volúmenes con los núcleos de reactante previstos para la absorción/captura de neutrones se construye preferentemente especialmente para la eliminación conveniente del material activado después de la irradiación. Además, puede usarse material enriquecido (por ejemplo ^{98}Mo al 80 por ciento o más de enriquecimiento).

Varias configuraciones a modo de ejemplo se especifican en más detalle más adelante en las Tablas 1-4, que especifican densidades, materiales, temperaturas, las dimensiones se especifican para la diana central 706 y las capas 710 (primera capa), 712 (segunda capa), 714 (tercera capa), 716 (cuarta capa) y 718 (quinta capa) para el sistema 700 de la FIG. 7. Debe entenderse que estas configuraciones se proporcionan como ejemplos sin limitar estas descripciones a aquellos ejemplos. No todas las configuraciones concebibles tendrán una diana central esférica y cinco capas concéntricas. Estos son solo ejemplos.

Estas configuraciones a modo de ejemplo se derivan de modelado informático usando códigos de transporte de neutrones. El modelado se realizó usando MCNP5, que es conocido y es frecuentemente usado por aquellos expertos en la materia. Por simplicidad, el modelado no incluyó materiales estructurales tales como aquellos mostrados en posiciones radiales correspondientes a los límites 720 722, 724, 726 en la FIG. 7. En un caso de modelado informático del sistema, resumido más adelante, se supuso que los neutrones de entrada iban a ser emitidos isotrópicamente desde la diana 706 a 8 MeV. En otros casos, el modelado informático del sistema supuso que se usó

un espectro sustancialmente mayor de energías de neutrones de entrada, con resultados similares. Obsérvese que los diversos materiales en las siguientes configuraciones pueden estar en forma gas, líquida o sólida dependiendo de la temperatura. En cada una, se supone que el molibdeno está uniformemente distribuido en su capa indicada por simplicidad, aunque no necesita ser para la operación.

Tabla 1 – Configuración 1

Cámara	Densidad (g/cm^3)	Material	Temperatura (grados K) (ºC)	Intervalo radial (cm)
Diana central	1,85	Berilio	300 (26,85)	0 - 20 cm
Capa 1	0	Vacío	N/A	20 - 30 cm
Capa 2	1,1	D_2O	300 (26,85)	30 - 35 cm
Capa 3	1,86	51 partes de O, 1 parte de ^{98}Mo	300 (26,85)	35 - 38 cm
Capa 4	1,1	D_2O	300 (26,85)	38 - 58 cm
Capa 5	1,1	D_2O	300 (26,85)	58 - 199 cm

Tabla 2 – Configuración 2

Cámara	Densidad (g/cm^3)	Material	Temperatura (grados K) (ºC)	Intervalo radial (cm)
Diana central	1,85	Berilio	300 (26,85)	0 - 20 cm
Capa 1	0	Vacío	N/A	20 - 30 cm
Capa 2	1,1	D_2O	30 (-243,15)	30 - 35 cm
Capa 3	1,86	51 partes de O, 1 parte de ^{98}Mo	30 (-243,15)	35 - 38 cm
Capa 4	1,1	D_2O	30 (-243,15)	38 - 58 cm
Capa 5	1,1	D_2O	300 (26,85)	58 - 199 cm

Tabla 3 – Configuración 3

Cámara	Densidad (g/cm^3)	Material	Temperatura (grados K) (ºC)	Intervalo radial (cm)
Diana central	1,85	Berilio	300 (26,85)	0 - 20 cm
Capa 1	0	Vacío	N/A	20 - 30 cm
Capa 2	1,1	D_2O	3 (-270,15)	30 - 35 cm
Capa 3	1,86	51 partes de O, 1 parte de ^{98}Mo	3 (-270,15)	35 - 38 cm
Capa 4	1,1	D_2O	3 (-270,15)	38 - 58 cm
Capa 5	1,1	D_2O	300 (26,85)	58 - 199 cm

Se predice que la eficiencia de neutrones va a de aproximadamente el

2 % al 15 % a medida que se pasa de la configuración 1 a la configuración 3, representado los rendimientos de producción lo que serían tasas de producción de ^{99}Mo comercialmente competitivas en la implementación de la máquina.

Tabla 4 – Configuración 4

Cámara	Densidad (g/cm^3)	Material	Temperatura (grados K) (ºC)	Intervalo radial (cm)
Diana central	1,85	Berilio	300 (26,85)	0 - 10 cm
Capa 1	0,12	Vacío	N/A	10 - 15 cm
Capa 2	2,85	22 partes de D_2O, 1 parte de ^{98}Mo	3 (-270,15)	15 - 20 cm
Capa 3	1,1	D_2O	3 (-270,15)	20 - 40 cm
Capa 4-5	1,1	D_2O	3 (-270,15)	40 - 199 cm

La configuración 4 tiene una eficiencia de neutrones estimada de aproximadamente el 20 %.

Podrían añadirse capas adicionales, o quitarse capas, o modificarse estos principios, o añadirse o cambiarse o alterarse geometrías o materiales sin cambiar la premisa de estas descripciones.

Se han descrito realizaciones particulares y características con referencia a los dibujos. Debe entenderse que estas descripciones no se limitan a ninguna realización única o cualquier conjunto particular de características, y que pueden surgir realizaciones y características similares o pueden hacerse modificaciones y adiciones sin apartarse del alcance de estas descripciones y el espíritu de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de producción de núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante, comprendiendo el aparato:

una pluralidad de núcleos de reactante y una pluralidad de núcleos moderadores en el que los núcleos moderadores comprenden núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22; y

una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico, en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones;

en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98;

en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %;

en el que la masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 1000 kg; y

en el que la masa de núcleos moderadores es al menos 1 kg.

2. El aparato de la reivindicación 1, en el que la masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 100 kg.

3. El aparato de la reivindicación 1, en el que la masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 25 kg.

4. El aparato de la reivindicación 2, en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 5 %.

5. El aparato de la reivindicación 1, que comprende además el uso de control de la temperatura capaz de mantener al menos 2 regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas;

en el que al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de 250 grados Kelvin.

6. El aparato de la reivindicación 5, en el que el control de la temperatura comprende el uso de un fluido criogénico.

7. El aparato de la reivindicación 1, que comprende además al menos un reflector de neutrones que rodea al menos parcialmente las pluralidades de núcleos de reactante y núcleos moderadores, en el que el reflector comprende núcleos moderadores y en el que el espesor del reflector es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros.

8. El aparato de la reivindicación 1, que comprende además tanto un reflector de neutrones externo como uno interno que reflejan neutrones hacia regiones que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

9. El aparato de la reivindicación 1, en el que las pluralidades están dispuestas en una o más capas aproximadamente paralelas, y en el que al

menos una capa es distinta de otra capa basándose en la composición elemental, concentración de especies químicas, densidad o temperatura.

10. El sistema de la reivindicación 1, que comprende además una diana configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas;

en el que la diana comprende átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos,

en el que las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

11. Un aparato de producción de núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante, comprendiendo el aparato:

una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico;

una primera pluralidad de núcleos de reactante que tiene una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio;

un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de una fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante;

una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en el que al menos aproximadamente el 90 % de los

núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante, y en el que la masa total de la segunda pluralidad de núcleos es mayor de aproximadamente 1 kilogramo; y

en el que la fuente de neutrones está en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones.

12. El aparato de la reivindicación 11, en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98, en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %.

13. El aparato de la reivindicación 11, en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98, en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 5 %.

14. El aparato de la reivindicación 11, en el que el aparato comprende además núcleos de producto de reacción de molibdeno-99 y núcleos de producto de desintegración de tecnecio-99m.

15. El método de la reivindicación 11, en el que la segunda pluralidad de núcleos comprende núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste

en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

16. El aparato de la reivindicación 11, que comprende además el uso de control de la temperatura para mantener al menos dos regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas, en el que al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de aproximadamente 250 grados Kelvin.

17. El aparato de la reivindicación 16, en el que el control de la temperatura comprende el uso de un fluido criogénico.

18. El aparato de la reivindicación 15, que comprende además al menos un reflector de neutrones que rodea al menos parcialmente la primera y segunda pluralidades de núcleos, en el que el reflector comprende núcleos de la segunda pluralidad de núcleos y en el que el espesor del reflector es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros.

19. El aparato de la reivindicación 15, que comprende además tanto un reflector de neutrones externo como uno interno que reflejan neutrones hacia regiones de las pluralidades que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

20. El aparato de la reivindicación 11, que comprende además una diana configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas, en el que la diana comprende átomos elegidos de un grupo que

consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos; y

en el que las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

21. Un método de producción de núcleos de producto de desintegración a partir de un isótopo reactante usando una fuente de neutrones, comprendiendo el método:

generar neutrones;

preparar una primera pluralidad de núcleos de reactante que tiene una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio;

preparar un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de una fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante;

preparar una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en el que al menos aproximadamente el 90 % de los núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante, y en el que la masa total de la segunda pluralidad de núcleos es mayor de aproximadamente 1 kilogramo; e

irradiar la pluralidad con los neutrones de forma que se genere un

producto de reacción cuando los neutrones son capturados por los núcleos de reactante; y

extraer de la pluralidad un producto de desintegración que se genera por desintegración radiactiva del isótopo de producto de reacción.

22. El método de la reivindicación 21, en el que los neutrones se generan por un reactor nuclear o un conjunto subcrítico.

23. El método de la reivindicación 21, en el que los neutrones se generan por una fuente que ni es un reactor ni un conjunto subcrítico.

24. El método de la reivindicación 21, en el que:

los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98; y

el producto de desintegración comprende tecnecio-99m; y

en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %.

25. El método de la reivindicación 21, en el que la segunda pluralidad de núcleos comprende núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

26. El método de la reivindicación 25, que comprende además rodear al menos parcialmente la primera y segunda pluralidades de núcleos con al

menos un reflector de neutrones que comprende núcleos de la segunda pluralidad de núcleos y cuyo espesor es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros.

27. El método de la reivindicación 25, que comprende además tanto un reflector de neutrones externo como uno interno que reflejan neutrones hacia regiones que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

28. El método de la reivindicación 21, que comprende además el uso de control de la temperatura capaz de mantener al menos 2 regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas;

en el que al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de 250 grados Kelvin.

29. El método de la reivindicación 28, en el que el control de la temperatura comprende el uso de un fluido criogénico.

30. El método de la reivindicación 21, que comprende además configurar una diana para emitir neutrones cuando es impactada por partículas aceleradas, en el que la diana comprende átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos, y

en el que las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las

partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

31. Un sistema de producción de un producto de desintegración a partir de un reactante usando una fuente de neutrones, que comprende:

una pluralidad de núcleos de reactante y una pluralidad de núcleos moderadores en el que los núcleos moderadores comprenden núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22; y

una fuente de neutrones;

en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98;

en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %;

en el que la masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 100 kg; y

en el que la masa de núcleos moderadores es al menos 1 kg.

32. El sistema de la reivindicación 31, en el que la fuente de neutrones es un reactor nuclear o conjunto subcrítico.

33. El sistema de la reivindicación 31, en el que los neutrones se generan por una fuente que ni es un reactor ni un conjunto subcrítico.

34. El sistema de la reivindicación 31, que comprende además una diana configurada para emitir neutrones cuando es impactada por partículas

aceleradas;

en el que la diana comprende átomos elegidos de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20, neón-22, tántalo, tungsteno, plomo, mercurio, talio, torio, uranio, neptunio y otros transuránicos, y

en el que las partículas aceleradas entran en el sistema mediante un canal de acceso configurado para aceptar más del 50 por ciento de las partículas aceleradas que impactan en el canal de acceso.

35. El sistema de la reivindicación 31, que comprende además al menos un reflector de neutrones que comprende núcleos moderadores, en el que el reflector de neutrones rodea al menos parcialmente las capas de las pluralidades de reactante y núcleos moderadores, y en el que el espesor del reflector de neutrones es mayor de aproximadamente 20 centímetros y menor de aproximadamente 15 metros.

36. El sistema de la reivindicación 31, que comprende además tanto un reflector de neutrones externo como uno interno que reflejan neutrones hacia regiones de las pluralidades que contienen mayores densidades de núcleos de reactante.

37. El sistema de la reivindicación 31, que comprende además el control de la temperatura capaz de mantener al menos 2 regiones diferentes del aparato a diferentes temperaturas, en el que al menos una región se enfría a una temperatura por debajo de 250 grados Kelvin.

38. El sistema de la reivindicación 37, en el que el control de la temperatura comprende un fluido criogénico.

39. Un proceso que comprende:

combinar una pluralidad de núcleos de reactante y una pluralidad de núcleos moderadores en el que los núcleos moderadores comprenden núcleos de átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22, junto con

poner una fuente de neutrones que ni es un reactor nuclear ni un conjunto subcrítico en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones;

en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98;

en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %;

en el que la masa de molibdeno-98 es inferior a aproximadamente 100 kg;

en el que la masa de núcleos moderadores es al menos 1 kg; e

irradiar la combinación con neutrones tal que se generen núcleos radiactivos de producto de reacción cuando los neutrones son capturados por los núcleos de reactante.

40. El proceso de la reivindicación 39, en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98, en el que la tasa de captura de neutrones de

núcleos de reactante dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %.

41. Un material radiactivo según la reivindicación 40, que comprende además extraer al menos uno de los núcleos de producto de reacción y núcleos de producto de desintegración de la combinación irradiada.

42. Un material radiactivo según la reivindicación 41, en el que los núcleos de producto de desintegración son tecnecio-99m.

43. Un sistema para producir núcleos de producto de reacción, que comprende núcleos de reactante, una fuente de neutrones en proximidad a los núcleos de reactante suficiente para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones y en el que al menos 100 g del sistema se enfrían a una temperatura a o por debajo de aproximadamente 250 Kelvin.

44. Un sistema según la reivindicación 43, en el que los núcleos de reactante comprenden molibdeno-98.

45. Un sistema según la reivindicación 44, en el que la tasa de captura de neutrones de núcleos de molibdeno-98 dividida entre la tasa de producción de neutrones por la fuente de neutrones es mayor de aproximadamente el 1 %.

46. Un sistema según la reivindicación 45, que comprende además núcleos moderadores, en el que los núcleos moderadores comprenden núcleos de

átomos que se eligen de un grupo que consiste en deuterio, tritio, helio-4, litio-7, berilio, boro-11, carbono, nitrógeno-15, oxígeno, flúor, neón-20 y neón-22.

47. Un aparato de producción de núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante, comprendiendo el aparato:

una fuente de neutrones;

una primera pluralidad de núcleos de reactante que tiene una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio;

un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de una fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante;

una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en el que al menos aproximadamente el 90 % de los núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante, y en el que la masa total de la segunda pluralidad de núcleos es mayor de aproximadamente 1 kilogramo; y

en el que la fuente de neutrones está en proximidad suficiente a los núcleos de reactante para producir núcleos de producto de reacción por captura de neutrones.

48. Un método de producción de núcleos de producto de desintegración a partir de un isótopo reactante usando una fuente de neutrones, comprendiendo el método:

generar neutrones;

preparar una primera pluralidad de núcleos de reactante que tiene una primera sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica promedio;

preparar un conjunto de isótopos que consiste en aquellos isótopos cuyas especies de núcleos capturan al menos el 1 % de todos los neutrones emitidos de una fuente de neutrones y que no son núcleos de reactante;

preparar una segunda pluralidad de núcleos que consiste en todos los núcleos del conjunto de isótopos, en el que al menos aproximadamente el 90 % de los núcleos tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos microscópicas que son inferiores a la sección transversal de captura de neutrones térmicos microscópica de cualquiera de los núcleos de reactante, y en el que la masa total de la segunda pluralidad de núcleos es mayor de aproximadamente 1 kilogramo; e

irradiar la pluralidad con los neutrones de forma que se genere un producto de reacción cuando los neutrones son capturados por los núcleos de reactante.

RESUMEN

PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS DE CAPTURA DE NEUTRONES DE ALTA EFICIENCIA

Un aparato para uso con una fuente de neutrones para producir núcleos de producto de reacción a partir de núcleos de reactante incluye una pluralidad de núcleos de reactante y una pluralidad de núcleos moderadores. Los núcleos de reactante y los núcleos moderadores están configurados para aumentar la probabilidad de captura de neutrones por núcleos de reactante para lograr relaciones mejoradas de captura de neutrones por núcleos de reactante con respecto a la producción de neutrones de la fuente de neutrones. Se usan núcleos moderadores y reflexión de neutrones para minimizar la fuga de neutrones. Puede usarse control de temperatura, que incluye control de temperatura criogénico, para potenciar la tasa o probabilidad de captura de neutrones de núcleos de reactante. Los núcleos de reactante pueden incluir molibdeno-98 y los núcleos de producto de reacción pueden incluir tecnecio-99m.

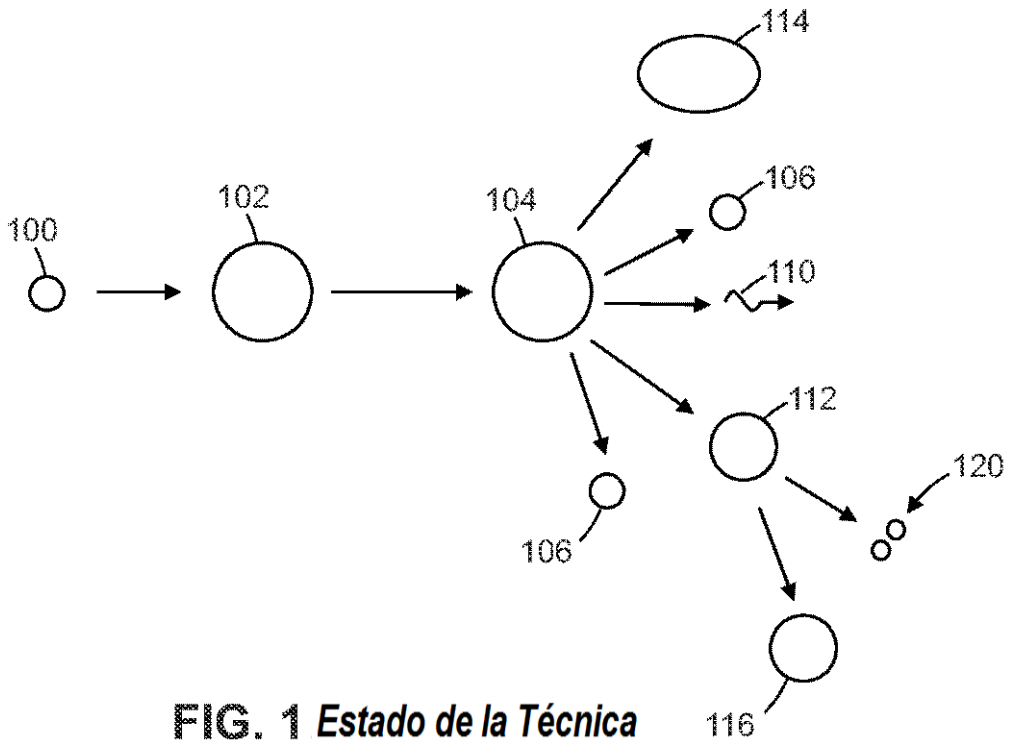

FIG. 1 ***Estado de la Técnica***

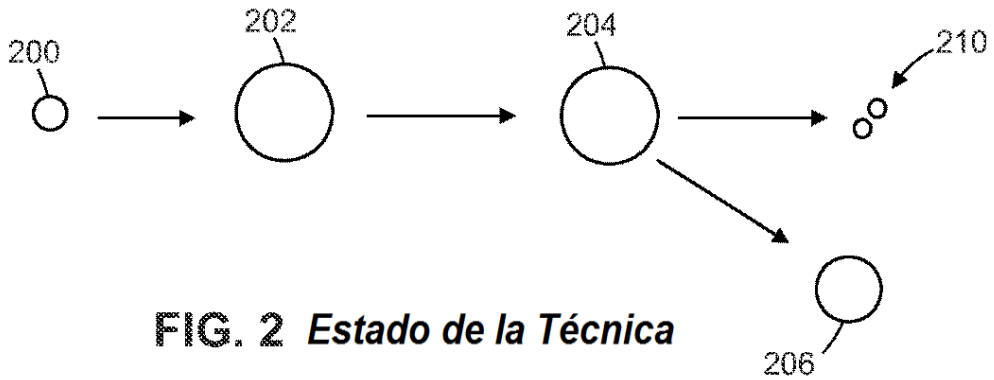

FIG. 2 ***Estado de la Técnica***

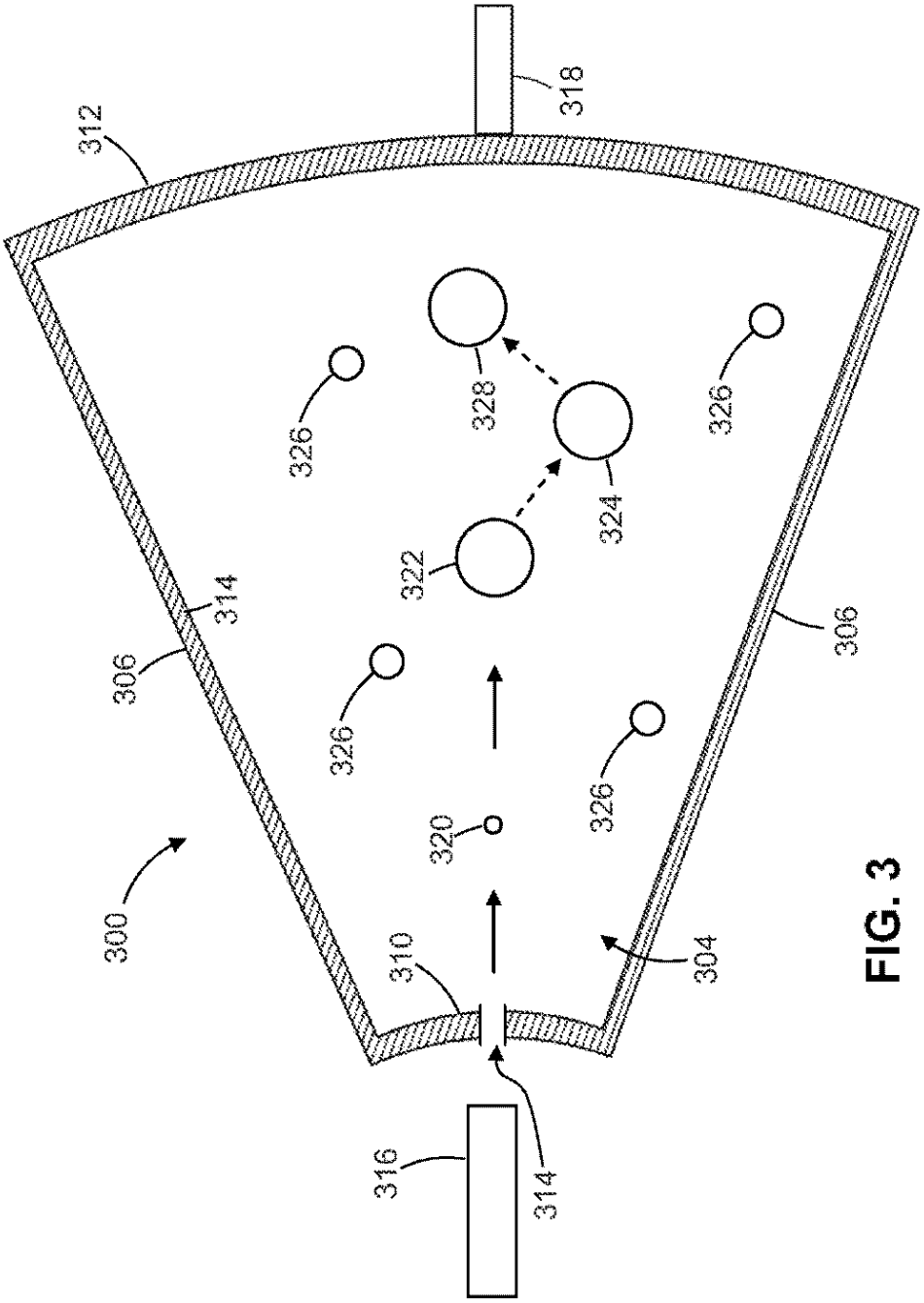
312
318
326
328
326
324
322
314
306
306
326
326
320
300
310
304
316
314

FIG. 3

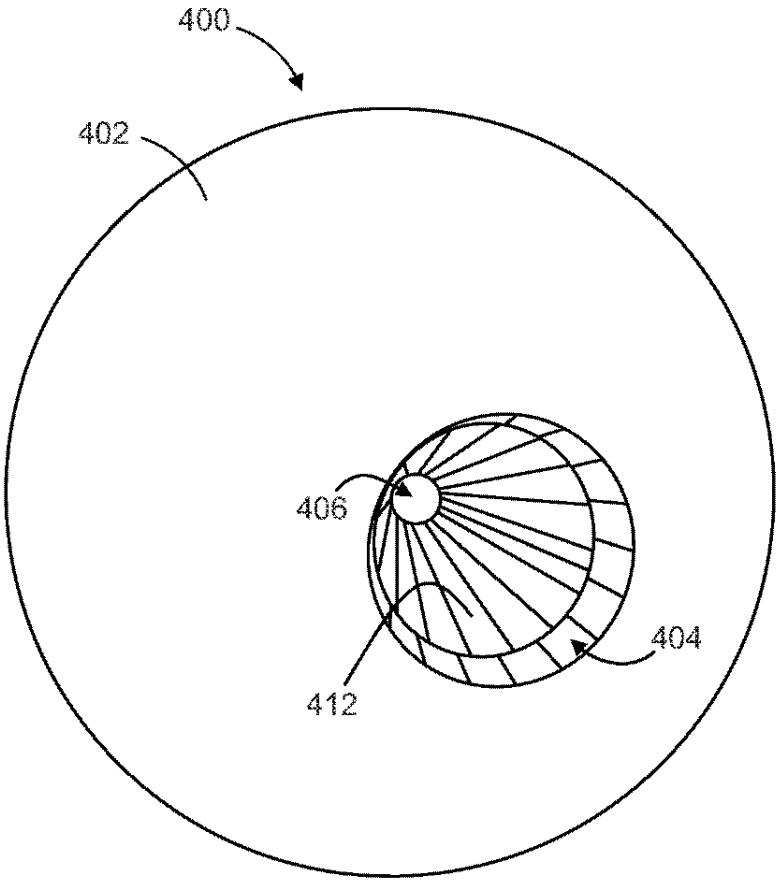

FIG. 4

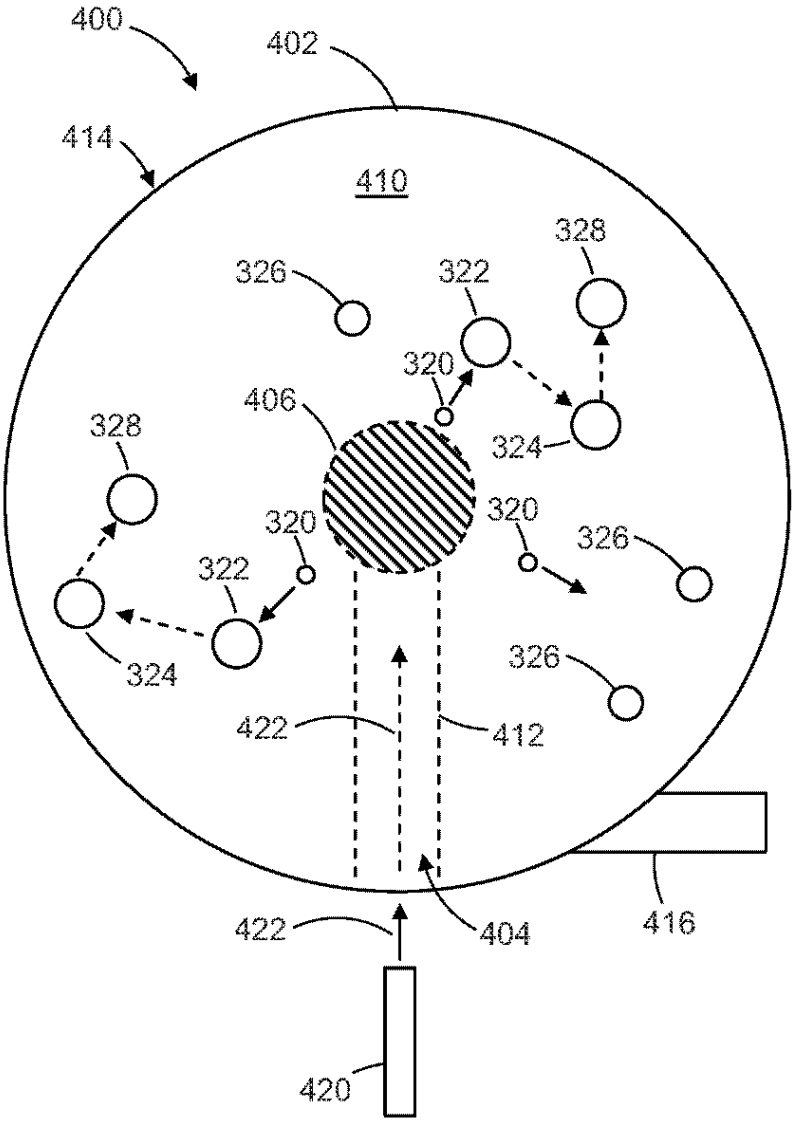
400
402
414
410
328
326
322
320
406
324
328
320
320
326
322
324
326
422
412
422
404
416
420

FIG. 5

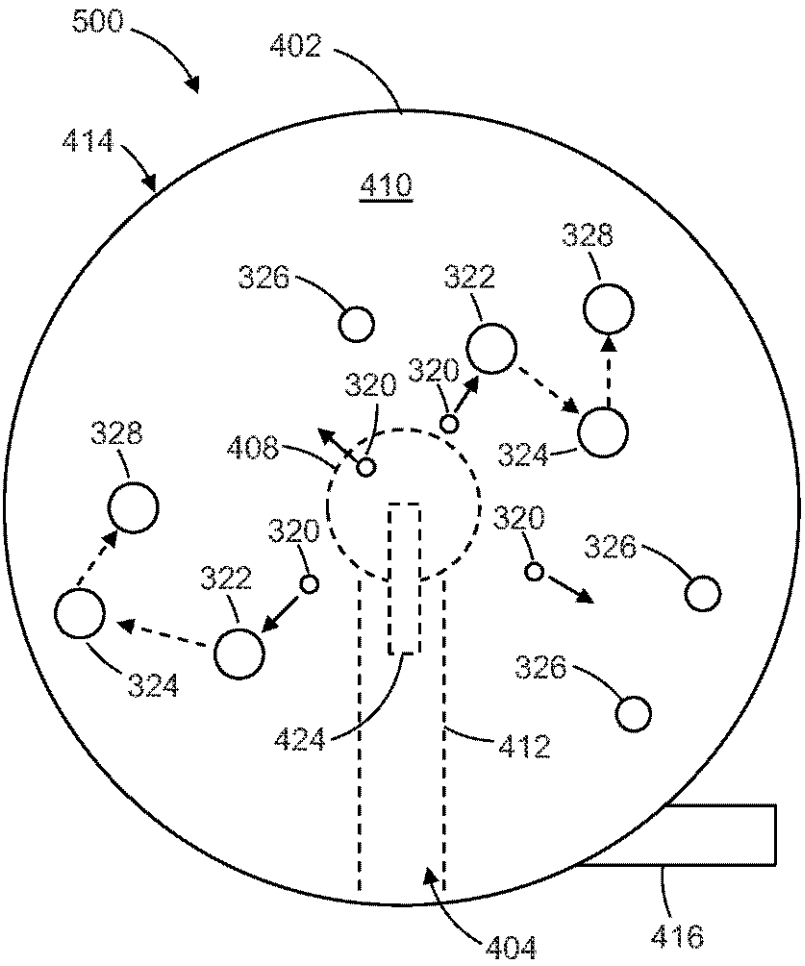
500
402
414
410
328
326
322
320
320
328
408
324
320
320
326
322
326
324
424
412
404
416

FIG. 6

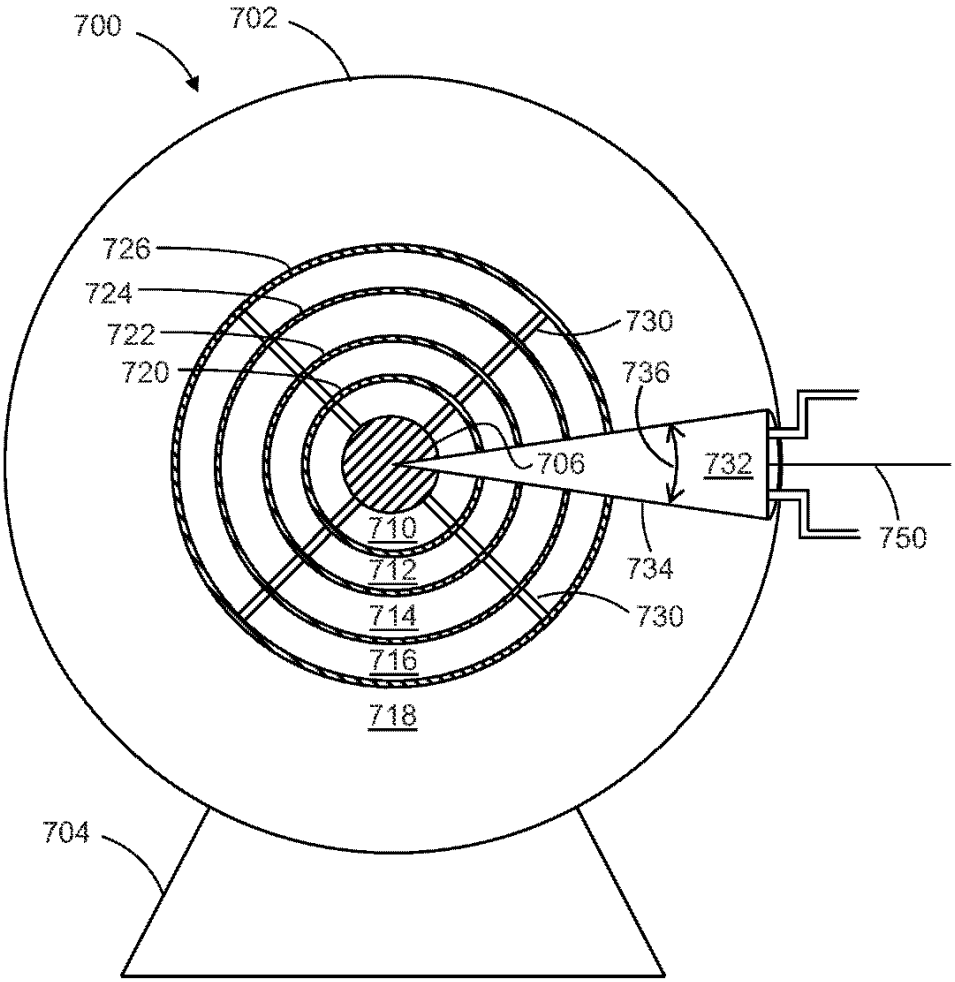
700
702
726
724
722
720
730
736
706
732
750
710
712
714
716
718
734
730
704

FIG. 7

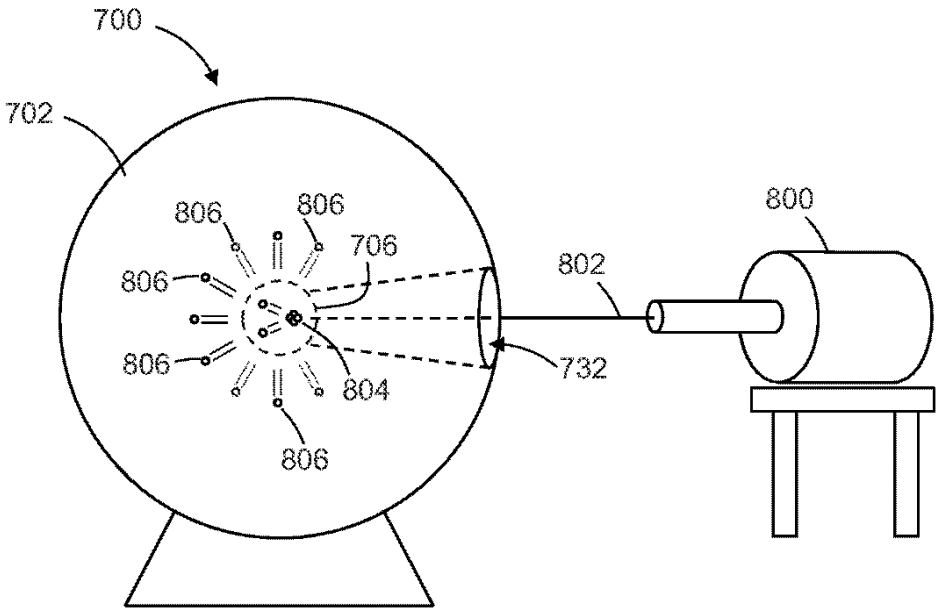

FIG. 8

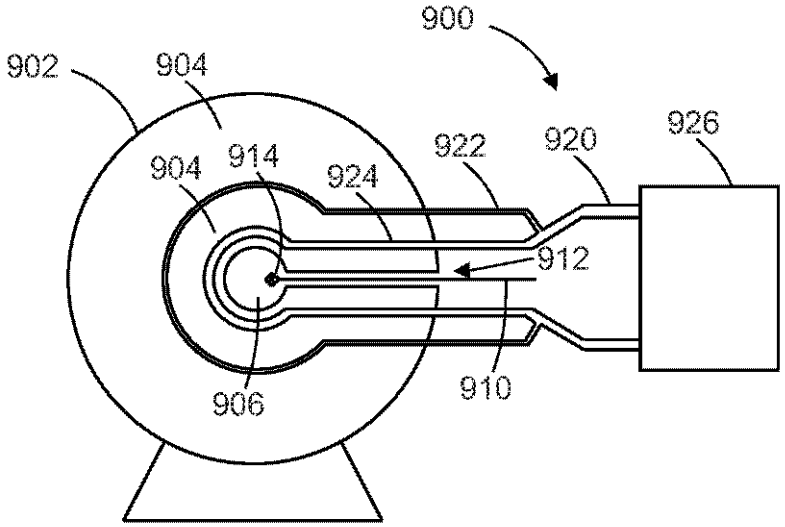

FIG. 9