

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 715 529**

51 Int. Cl.:

G21C 3/326 (2006.01)
G21C 3/02 (2006.01)
G21C 1/00 (2008.01)
G21C 1/02 (2006.01)
G21C 3/33 (2006.01)
G21C 3/60 (2006.01)
G21C 5/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.12.2008** **E 16153633 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.02.2019** **EP 3032541**

54 Título: **Un elemento combustible y un método para fabricar un elemento combustible para un conjunto combustible de un reactor nuclear**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
04.06.2019

73 Titular/es:

THORIUM POWER, INC. (100.0%)
1600 Tysons Blvd., Suite 550
McLean, VA 22102, US

72 Inventor/es:

BASHKIRTSEV, SERGEY MIKHAILOVICH;
KUZNETSOV, VALENTIN FEDOROVICH;
KEVROLEV, VALERY VLADIMIROVICH y
MOROZOV, ALEXEY GLEBOVICH

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 715 529 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Un elemento combustible y un método para fabricar un elemento combustible para un conjunto combustible de un reactor nuclear

5 La invención en general entra dentro de la categoría de los elementos estructurales de los reactores nucleares de agua ligera en los que se usa el torio como el combustible y, en particular, dentro de la categoría de los elementos estructurales de los conjuntos combustibles sin camisa en la forma de un cuadrado a partir del cual se forman los núcleos de los reactores de potencia moderados y refrigerados por agua, que se conocen como reactores del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.).

10 La energía nuclear sigue siendo un recurso energético esencial en todo el mundo hoy en día. Muchos países que no tienen suficientes recursos combustibles fósiles dependen principalmente de la energía nuclear para generar electricidad. En muchos otros países, la energía nuclear se usa como una fuente competitiva para la generación de electricidad, lo que también aumenta la diversidad de los tipos de energía usada. Además, la energía nuclear también hace una contribución muy significativa al logro de objetivos tales como el manejo de la contaminación ambiental asociada con los combustibles fósiles (por ejemplo, lluvia ácida y el calentamiento global) y la preservación del combustible fósil para las generaciones futuras.

15 A pesar de que la seguridad es inequívocamente el principal problema que rodea el diseño y la operación de los reactores nucleares, otro tema clave incluye el peligro de la proliferación de materiales que pueden usarse en las armas nucleares. Esto es especialmente válido para los países con gobiernos inestables, la posesión de armas nucleares por lo que podría representar una amenaza considerable para la seguridad mundial. Por esta razón, la energía nuclear debe generarse y usarse de tal manera que no conduzca a la proliferación de armas nucleares y al riesgo resultante de su uso.

20 Todos los reactores nucleares existentes en este momento producen una gran cantidad de un material que se acostumbra llamar plutonio de grado reactor. Por ejemplo, un reactor convencional de 1000 megavatios (MW) genera en la magnitud de 200-300 kilogramos (kg) de plutonio de grado reactor al año lo que podría ser adecuado para fabricar armas nucleares. Por lo tanto, el combustible descargado de los núcleos de los reactores convencionales es un material enormemente multiplicador y requiere medidas de precaución para garantizar que el combustible descargado no caiga en manos de las personas que no tienen derecho a poseerlo. También existe un problema de seguridad similar con relación a las enormes reservas de plutonio de grado militar que se crean en los Estados Unidos de América (EE. UU.) y en los países de la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) cuando se desmontaron las armas nucleares.

25 Otro problema asociado con la operación de los reactores nucleares convencionales proviene de la necesidad continua de eliminación de desechos radiactivos de larga duración, así como también al rápido agotamiento de los recursos mundiales de materias primas de uranio natural.

30 Para resolver estos problemas, recientemente se han hecho intentos para crear reactores nucleares que funcionen con cantidades relativamente pequeñas de uranio enriquecido no proliferativo (el uranio enriquecido tiene un contenido de U-235 de 20 % o menos) y no produce cantidades significativas de materiales multiplicadores tal como el plutonio. Ejemplos de tales reactores se describieron en las solicitudes internacionales WO 85/01826 y WO 93/16477, en donde los reactores con un núcleo sembrado y de reproducción que contiene una región de siembra y una región de reproducción que derivan un porcentaje considerable de su energía de las regiones de reproducción, con el torio que sirve como combustible. Las regiones de reproducción rodean una región de siembra, dentro de la cual se localizan las varillas de combustible hechas de uranio enriquecido no proliferativo. El uranio en las varillas de combustible de la región de siembra emite neutrones que son capturados por el torio en las regiones de reproducción, en virtud de lo cual se crea el U-233, capaz de fisión nuclear, que se quema in situ y libera calor para la planta de potencia del reactor.

35 El uso de torio como combustible del reactor nuclear es atractivo, ya que las reservas de torio en todo el mundo superan significativamente las reservas de uranio. Además, ambos reactores mencionados anteriormente no son proliferativos en el sentido de que ni el combustible cargado inicialmente ni el combustible descargado al final de cada ciclo combustible es adecuado para fabricar armas nucleares. Esto se logra en virtud del hecho de que solo se usa uranio enriquecido no proliferativo como el combustible de la región de siembra, durante el cual se seleccionan las relaciones moderador/volumen de combustible que dan como resultado la formación mínima de plutonio. Y una pequeña cantidad de uranio enriquecido no proliferativo se agrega a la región de reproducción, dentro de la cual el componente U-238 se mezcla homogéneamente con la sobra de U-233 al final del ciclo de reproducción y "desnaturaliza" el U-233 (altera su propiedades naturales), como resultado de lo cual se convierte en inadecuado para la fabricación de armas nucleares.

40 Desafortunadamente, ninguno de los diseños de reactores mencionados anteriormente es realmente "no proliferativo". En particular, se descubrió que ambos diseños resultan en un nivel de formación de plutonio proliferativo en la región de siembra que excede el nivel mínimo posible. El uso de una región de siembra redonda con una región de reproducción interna o central y una región de reproducción circundante externa no puede garantizar la operación de un reactor como un reactor "no proliferativo", ya que la región de siembra redonda delgada tiene un "grosor óptico" correspondientemente pequeño, lo que resulta en el hecho de que el espectro de la región de siembra (de neutrones) dominará sobre el espectro considerablemente más duro de las regiones de reproducción internas y externas. Esto conduce al origen de una mayor

proporción de neutrones epitermales en la región de siembra, así como también a la producción de plutonio multiplicador, en una cantidad mayor que la cantidad mínima.

Además, ninguno de estos diseños de reactores anteriores se ha optimizado desde el punto de referencia de parámetros de operación. Por ejemplo, las relaciones moderador/volumen de combustible en la región de siembra y las regiones de reproducción son especialmente críticas para la producción de una cantidad mínima de plutonio en la región de siembra, a fin de garantizar que se libere una cantidad adecuada de calor de las varillas de combustible en la región de siembra y para la conversión óptima de torio en U-233 en la región de reproducción. Las investigaciones han demostrado que los valores de las relaciones moderador/combustible preferidos, especificados en estas solicitudes internacionales, son demasiado altos en la región de siembra y demasiado bajos en las regiones de reproducción.

Los diseños de núcleos anteriores tampoco fueron especialmente eficientes cuando se usó uranio enriquecido no proliferativo en los elementos combustibles de la región de siembra. Como resultado, las varillas de combustible descargadas al final de cada ciclo combustible de la región de siembra, por consiguiente contenían tanto uranio sobrante que fue necesario procesarlo para reutilizarlos en otro núcleo reactor.

El reactor descrito en la solicitud WO 93/16477 también requiere un circuito de control mecánico del reactor complicado que lo hace inadecuado para el reequipamiento de un núcleo reactor convencional. Igualmente, el núcleo del reactor descrito en la solicitud WO 85/01826 no puede transferirse fácilmente a un núcleo convencional, ya que sus parámetros de diseño no son compatibles con los de un núcleo convencional.

Finalmente, los dos diseños de reactores anteriores fueron concebidos especialmente para quemar uranio enriquecido no proliferativo con torio y no son adecuados para el uso de una gran cantidad de plutonio. En consecuencia, ninguno de estos diseños garantiza la resolución del problema del plutonio acumulado almacenado.

Se conoce un reactor de la patente RU 2176826 con un núcleo, que incluye una serie de regiones de siembra y capa fértil, cada una de las cuales contiene una región de siembra central. Cada región de siembra incluye los elementos combustibles de la región de siembra, hechos de un material capaz de fisión nuclear que contiene uranio-235 y uranio-238, una región de reproducción circular que rodea la región de siembra. El reactor también incluye los elementos combustibles de reproducción de la región de reproducción, que contienen principalmente torio y uranio enriquecido en un volumen de 10 % o menos, un moderador de la región de alimentación, donde la relación moderador/volumen de combustible entra dentro de un intervalo de valores de 2,5 a 5,0, y un moderador de la región de reproducción, donde la relación moderador/combustible entra dentro de un intervalo de valores de 1,5-2,0. En la presente, cada uno de los elementos combustibles de la región de siembra incluye una aleación de uranio-zirconio (U-Zr) y la región de siembra comprende 25-40 % del volumen total de cada región de siembra y de capa fértil.

El reactor conocido garantiza la operación óptima desde el punto de vista económico y no es "proliferativo". Este reactor puede usarse para consumir grandes cantidades de plutonio y torio sin producir simultáneamente productos de desecho que constituyen materiales proliferativos. En la presente, el reactor sujeto genera cantidades considerablemente más pequeñas de productos de desecho altamente radioactivos, como resultado de lo cual se reduce la necesidad de localizaciones de almacenamiento de desecho a largo plazo.

Sin embargo, las regiones de siembra y de capa fértil empleadas en este reactor no son adecuadas para su uso en los reactores de agua ligera existentes del tipo PWR antes mencionado (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.).

Un conjunto combustible de reactor de agua ligera se conoce a partir de la descripción de la patente RU 222837, que es similar al reactor descrito anteriormente, que tiene, en particular, una sección transversal en forma cuadrada que hace posible instalar este conjunto combustible, hecho de regiones sembradas y de capa fértil, en un reactor convencional de agua ligera.

Sin embargo, además de indicar la forma de la sección transversal del conjunto, la descripción de la patente mencionada anteriormente no contiene información sobre las variaciones estructurales del conjunto que facilitarían su instalación en un reactor de agua ligera existente del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.) sin realizar cambios de ningún tipo en el diseño del reactor.

Un conjunto combustible de reactor de agua ligera se conoce a partir de la patente RU 2294570 que contiene un grupo de elementos combustibles, tubos guías alojados en las rejillas espaciadoras, una tobera inferior, y una tobera superior, donde las rejillas espaciadoras también se interconectan en la tobera inferior por los componentes posicionados a lo largo de la longitud del conjunto combustible, mientras que la tobera superior incluye las placas conectadas superior e inferior, un anillo de virola que se posiciona entre estas placas y un conjunto de resortes; aquí, el anillo de virola de la tobera superior se equipa con nervaduras exteriores, cuyas secciones sobresalientes se interconectan por un borde y la sección inferior de las cuales se interconectan por placas perforadas.

El conjunto combustible conocido entra dentro de la categoría de diseños de conjunto combustible sin camisa, a partir de los cuales se forman los núcleos de los reactores de potencia moderados y refrigerados por agua, del tipo VVER-1000, y tiene propiedades de rendimiento mejoradas debido a la mayor rigidez y menor longitud de la tobera superior, así como

también un espacio libre ampliado entre el grupo de elementos combustibles y la tobera superior, acompañado por un aumento simultáneo en la longitud del elemento combustible. Esto hace posible aumentar la carga del conjunto combustible con un combustible que tiene una alta fracción de quemado y, por lo tanto, aumentar la potencia del núcleo del reactor, así como también el tiempo de operación del conjunto combustible.

Sin embargo, todos los elementos combustibles en este conjunto se fabrican de material fisible tradicionalmente usado en reactores de agua ligera; por consiguiente, la deficiencia descrita anteriormente es inherente a un reactor con conjuntos de este tipo: la producción de una gran cantidad de plutonio de grado reactor. Además, el conjunto objeto se ha adaptado para reactores del tipo VVER-1000; es decir, tiene una sección transversal en forma de hexágono, que no coincide con la forma de los conjuntos combustibles usados en los reactores del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.).

El objetivo de la invención incluye crear un conjunto combustible que no produzca desechos que constituyan materiales proliferativos durante su uso. Por otro lado, se puede colocar en un reactor de agua ligera existente del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.) sin la necesidad de su modificación sustancial.

El documento RU-A-2170956-C1 describe un elemento combustible para su uso en un conjunto combustible de un reactor nuclear y un método para fabricar el mismo. El elemento combustible que comprende un núcleo que tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral que incluyen uranio o plutonio enriquecido; y un revestimiento que encierra el núcleo, en donde el elemento combustible tiene un perfil cuatrilobulado que incluye los nervios espaciadores en espiral, y los nervios espaciadores espiral tienen un paso de torsión axial de entre el 5 % y el 30 % de una longitud del elemento combustible. El método que comprende fabricar el elemento combustible mediante el uso de una técnica de moldeado combinada por extrusión a través de un troquel hembra en forma de una sola unidad del conjunto para formar el elemento combustible que comprende un núcleo y un revestimiento; en donde, después de dicha extrusión, el núcleo tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral que comprende uranio o plutonio enriquecido; en donde, después de dicha extrusión, el revestimiento encierra el núcleo; en donde, después de dicha extrusión, los nervios espaciadores en espiral tienen un paso de torsión axial de entre el 5 % y el 30 % de una longitud del elemento combustible.

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un elemento combustible como se describe en el documento RU-A-2170956-C1, caracterizado porque el núcleo comprende una aleación de uranio-zirconio (U-Zr), con una fracción de uranio de 30 % o menos; con el uranio enriquecido hasta un 20 % o menos por un isótopo de uranio-235.

En las modalidades, el revestimiento comprende aleación de zirconio. En las modalidades, el elemento combustible se fabrica en forma de una única unidad del conjunto por extrusión a través de un troquel hembra. En las modalidades, el elemento combustible comprende además un flotador que se posiciona a lo largo de un eje longitudinal del elemento combustible. Preferentemente, el flotador comprende zirconio o una aleación del mismo. Adicional o alternativamente, el flotador tiene una forma de sección transversal cuadrada que define cuatro esquinas. Preferentemente, los lóbulos del elemento combustible definen puntas, y las cuatro esquinas de la forma de sección transversal cuadrada del flotador se localizan en ejes que pasan a través de las puntas de los lóbulos. En las modalidades, en una sección transversal del elemento combustible que es perpendicular al eje longitudinal, el núcleo rodea al flotador.

De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, se proporciona un método como se describió en RU-A-2170956-C1, caracterizado porque el núcleo comprende una aleación de uranio-zirconio (U-Zr), con una fracción de uranio del 30 % o menos; con el uranio enriquecido hasta un 20 % o menos por un isótopo de uranio-235.

En las modalidades preferidas, el revestimiento comprende aleación de zirconio. En las modalidades preferidas, el método comprende además formar un flotador posicionado a lo largo de un eje longitudinal del elemento combustible. En las modalidades preferidas, los lóbulos del elemento combustible definen las puntas, y el flotador tiene una forma de sección transversal cuadrada que define cuatro esquinas que se localizan en ejes que pasan a través de las puntas de los lóbulos.

Un primer ejemplo de un conjunto combustible de reactor nuclear de agua ligera con forma cuadrada en la vista en planta contiene una región de siembra que incluye un grupo de elementos combustibles de siembra que se disponen en sección transversal en las hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas; en la presente, cada elemento combustible sembrado contiene un núcleo, que incluye uranio o plutonio enriquecido, y una región de capa fértil, que rodea la región de siembra antes mencionada y contiene un grupo de elementos combustibles de reproducción, cada uno de los cuales contiene torio cerámico; en este caso, los elementos combustibles de reproducción se disponen en sección transversal en dos hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas dentro de dos anillos de forma cuadrada.

El conjunto combustible también contiene tubos guías que se disponen dentro de la región de siembra de tal manera que coincida con la posición de los tubos guías para las varillas de control del conjunto combustible de un reactor nuclear del tipo PWR, garantizando de esta manera su intercambiabilidad. En particular, el conjunto combustible contiene 24 tubos guías que se disponen dentro de la región de siembra de tal manera que coincidan con la posición de los 24 tubos guías para las varillas de control del conjunto combustible de 17x17 de un reactor nuclear del tipo PWR, garantizando de esta manera su intercambiabilidad.

Cada conjunto de elementos combustibles de siembra tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral.

5 Predominantemente los elementos combustibles de la región de capa fértil dentro de la sección transversal del conjunto combustible se posicionan en las dos hileras y columnas más exteriores de una red de coordenadas cuadradas formada por 19 hileras y 19 columnas, mientras que los elementos combustibles de siembra se posicionan en las hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas formada por 13 hileras y 13 columnas.

10 En la presente, el conjunto combustible contiene un canal que tiene una forma cuadrada en la sección transversal, y que separa los elementos combustibles de la región de siembra de los elementos combustibles de la región de capa fértil. La tobera inferior de la región de siembra se conecta al canal, al cual se une una estructura del bastidor de soporte con el fin de asegurar los elementos combustibles de siembra. Además, una rejilla de guía se une a la sección superior del canal para facilitar la colocación de los elementos combustibles de siembra para hacer posible su libre movimiento axial.

15 Predominantemente, el número de elementos combustibles de siembra es de 144 artículos, mientras que el número de elementos combustibles de reproducción es de 132 artículos.

20 La región de capa fértil contiene una tobera inferior de la región de capa fértil, unidades de ángulo dispuestas longitudinalmente y varios polos dispuestos longitudinalmente; en la presente, la tobera inferior de la región de capa fértil se conecta rígidamente a las unidades de ángulo y polos antes mencionados, formando de esta manera una estructura del bastidor de la región de capa fértil. En este caso, el número de unidades de ángulo, como el número de polos, es predominantemente igual a cuatro.

25 Las rejillas espaciadoras se aseguran a la estructura del bastidor. En la zona central de cada una de las rejillas se ejecuta una abertura para alojar la región de siembra en la misma.

30 Las regiones de siembra y de capa fértil se interconectan por medio de un mecanismo de bloqueo que hace posible insertar colectivamente estos módulos en un núcleo del reactor nuclear y extraerlos del núcleo como una sola unidad, así como también garantizar la posibilidad de separar las regiones de siembra y de capa fértil.

En un segundo ejemplo del conjunto combustible, a diferencia del primer ejemplo descrito anteriormente, los elementos combustibles de reproducción se disponen en sección transversal en las hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas dentro de tres anillos de forma cuadrada.

35 En la presente, algunos de los tubos guías se sitúan dentro de la región de siembra, mientras que el resto de los canales se sitúan con la región de capa fértil; en este caso, todos los tubos guías se disponen de tal manera que coincidan con la posición de los tubos guías para las varillas de control del conjunto combustible de un reactor nuclear del tipo PWR, garantizando de esta manera su intercambiabilidad.

40 Los elementos combustibles de la región de siembra y de capa fértil se disponen en sección transversal en 17 hileras y 17 columnas de una red de coordenadas cuadradas, durante la cual los elementos combustibles de siembra se posicionan en la sección media de esta rejilla en 11 hileras y 11 columnas.

45 El conjunto combustible en el segundo ejemplo, al igual que el conjunto en el primer ejemplo, contiene un canal que tiene una forma en sección transversal cuadrada y que separa los elementos combustibles de la región de siembra de los elementos combustibles de la región de capa fértil. Aquí, 16 tubos guía se localizan dentro del canal, mientras que 8 se localizan fuera de este de tal manera que coincidan con la posición de las 24 varillas de control de un conjunto combustible de 17 x 17 de un reactor nuclear del tipo PWR, garantizando de esta manera su intercambiabilidad. La tobera inferior de la región de siembra también se conecta al canal, al cual se une una estructura del bastidor de soporte con el fin de asegurar los elementos combustibles de siembra. Además, una rejilla de guía se une a la sección superior del canal para facilitar la colocación de los elementos combustibles de siembra que hace posible su libre movimiento axial.

50 En este segundo ejemplo del conjunto combustible, a diferencia del primer ejemplo descrito anteriormente, la multitud de elementos combustibles de siembra incluye una multitud de elementos combustibles de siembra primarios que se disponen en sección transversal en 9 hileras y 9 columnas de la sección media de una red de coordenadas cuadradas, así como también una multitud de elementos combustibles de siembra secundarios que se posicionan en las hileras y columnas más exteriores de la sección media de la red de coordenadas cuadradas. En ese sentido, cada uno de la multitud de elementos combustibles de siembra primarios tiene un ancho mayor en las esquinas que el de cada uno de los elementos combustibles de siembra secundarios. En la presente, la multitud de elementos combustibles de siembra primarios contiene 72 elementos, mientras que la multitud de elementos combustibles de siembra secundarios contiene 36 elementos.

60 Los elementos combustibles de siembra secundarios en cada una de las dos hileras y cada una de las dos columnas de la sección transversal de la región de siembra se desplazan hacia el centro del canal, mientras que los dispositivos para limitar el movimiento lateral de los elementos combustible de siembra se localizan en la superficie interior del canal entre dos elementos combustibles de siembra secundarios adyacentes para evitar el desplazamiento lateral de los elementos

combustibles de siembra. Estos dispositivos se pueden diseñar en forma de áreas elevadas en el canal de la región de siembra, o en forma de varillas que se disponen longitudinalmente dentro del canal.

5 La multitud de elementos combustibles de reproducción en este ejemplo del conjunto incluye 156 elementos combustibles de reproducción que se sitúan dentro de la sección transversal del conjunto combustible en las tres hileras y columnas más exteriores de la red de coordenadas cuadradas.

10 La región de capa fértil en este ejemplo, al igual que una en el primer ejemplo, contiene una tobera inferior de la región de capa fértil; sin embargo, en el presente ejemplo, esta tobera inferior se conecta rígidamente a los tubos guías que se localizan en la región de capa fértil para formar una estructura del bastidor de la región de capa fértil. Las rejillas espaciadoras también se aseguran a la estructura del bastidor. En la zona central de cada una de las rejillas se ejecuta una abertura para alojar la región de siembra en la misma.

15 Similar al conjunto que corresponde al primer ejemplo, las regiones de siembra y de capa fértil se interconectan por medio de un mecanismo de bloqueo que hace posible insertar colectivamente estos módulos en un núcleo del reactor nuclear y extraerlos del núcleo como una sola unidad, así como también para garantizar la posibilidad de separar las regiones de siembra y de capa fértil.

20 Las dimensiones y la forma, así como también las propiedades neutrónicas y termohidráulicas, de los conjuntos combustibles que corresponden tanto al primer como al segundo ejemplos mismos, coinciden con las dimensiones y la forma, así como también las propiedades neutrónicas y termohidráulicas, de un conjunto combustible tradicional para un reactor nuclear del tipo PWR, lo que garantiza de esta manera su intercambiabilidad. En ese sentido, la energía de salida del conjunto combustible, cuando se coloca en un reactor nuclear en lugar de un conjunto combustible tradicional para un reactor nuclear del tipo PWR, sin realizar ningún cambio adicional en el diseño del reactor, se encuentra dentro de los límites de intervalo de diseño de un reactor destinado a operar con conjuntos combustibles tradicionales.

25 En un tercer ejemplo, el elemento combustible de un conjunto combustible de reactor nuclear contiene un núcleo, que incluye uranio o plutonio enriquecido, y tiene un perfil cuatrilobulado. Además del núcleo, el elemento contiene un revestimiento que rodea el núcleo. Los lóbulos del perfil forman nervios espaciadores en espiral; en los que, el paso de torsión axial de los nervios espaciadores en espiral varía de 5 % a 30 % de la longitud del elemento combustible. El revestimiento se hace de una aleación de zirconio; un flotador que tiene una forma de sección transversal casi cuadrada se posiciona a lo a lo largo del eje longitudinal del núcleo. El flotador se hace de zirconio o una aleación del mismo; el núcleo se hace de una aleación de uranio-zirconio (U-Zr) con una fracción de uranio de hasta el 30 %; en la que, el uranio se enriquece hasta un 20 % mediante el uso un isótopo de uranio-235. El núcleo se hace de una aleación de plutonio-zirconio (Pu-Zr) con una fracción de plutonio de grado energético de hasta el 30 %.

Un reactor de agua ligera puede contener una multitud de conjuntos combustibles, al menos, uno o todos los conjuntos combustibles se ejecutan de acuerdo con uno de los ejemplos descritos anteriormente.

40 Las particularidades y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de sus modalidades preferidas teniendo en cuenta los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 - ofrece una vista general de un conjunto combustible;

La Figura 2 - una vista de disposición en sección transversal de un conjunto combustible;

45 La Figura 3 - una vista general de un conjunto combustible;

La Figura 4 - una vista de disposición en sección transversal de un conjunto combustible;

La Figura 5 - una vista de disposición de la localización de los elementos combustibles en la región periférica de la región de siembra;

La Figura 6 - una vista de diseño en la perspectiva de un elemento combustible de la región de siembra;

50 La Figura 7 - una vista de disposición en sección transversal de un elemento combustible de la región de siembra;

La Figura 8 - una vista de disposición de una versión de la conexión de la tobera inferior de la región de siembra y de capa fértil;

La Figura 9 - una vista de disposición de la localización del elemento combustible de la región de capa fértil en una rejilla espaciadora;

55 La Figura 10: una vista en sección transversal de un núcleo del reactor que contiene conjuntos combustibles ejecutados de acuerdo con la invención.

60 En la Figura 1 se muestra un primer ejemplo de un conjunto combustible designado como elemento colectivo 1. El conjunto combustible 1 contiene una región de siembra 2, una región de capa fértil 3, una tobera superior 4, una tobera inferior de la región de siembra 5 y una tobera inferior de la región de capa fértil 6. Como se muestra en la Figura 2, la región de siembra 2 contiene el grupo de elementos combustibles 7, mientras que la región de capa fértil 3 contiene el grupo de elementos combustibles 8. Cada uno de los elementos combustibles en el grupo 7 tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral, 9 (Figura 6), a lo largo de la longitud de un elemento combustible y contiene un núcleo, 10 (Figura 7), que incluye uranio o plutonio enriquecido, así como también un revestimiento hecho de una aleación de zirconio, 11, que lo rodea. Un flotador, 12, se localiza dentro del núcleo 10. Todos los elementos combustibles 7 hacen contacto con cada elemento combustible adyacente en el grupo 7 en los puntos de contacto del nervio espaciador en

espiral 9. Los puntos de contacto del nervio espaciador en espiral 9 se alejan entre sí en la dirección axial a una distancia igual al 25 % del valor de paso de la línea espiral.

Cada uno de los elementos combustibles 8 tiene una forma redonda en la vista en planta y se hace de torio, con la adición de uranio enriquecido. El módulo de elementos combustibles 7 y 8 se disponen en las hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas en una sección transversal, de manera que el conjunto combustible en su totalidad tiene la forma de un cuadrado en la vista en planta. En particular, los elementos combustibles del módulo 7 se disponen en las hileras de columnas de una red de coordenadas cuadradas, compuestas por 13 hileras y 13 columnas, mientras que los elementos combustibles de la región de capa fértil 8 se posicionan en las dos hileras y columnas más exteriores de una red de coordenadas cuadradas, compuesta por 19 hileras y 19 columnas.

Los perfiles de cada elemento combustible del grupo 7 tienen un ancho idéntico a través de las esquinas, que ascienden, por ejemplo, a 12,6 milímetros (mm). El número de elementos combustibles 7 es 144. Los elementos combustibles 8 tienen un diámetro idéntico, que asciende, por ejemplo, a 8,6 milímetros (mm), y se posicionan a lo largo de los lados del cuadrado en dos hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas. El número de elementos combustibles 8 es 132.

Un tubo 13 se localiza en el centro de la región de siembra 2, que forma un canal de guía para alojar los controles en el mismo. Los tubos guías 14 se localizan dentro de los confines de región de siembra 2 para la inserción de las barras absorbentes y las barras de seguridad, que se posicionan en la tobera superior 4 con el fin de hacer posible el desplazamiento axial, además de estar unidos a la boquilla inferior 5 de la región de siembra 2 y la tobera inferior 6 de la región de capa fértil 3 por medio de una junta roscada 15 o un accesorio de recolección 16 (Figura 8).

El grupo de elementos combustibles 7 de la región de siembra 2 está rodeado por un canal 17, que se asegura en la tobera inferior 5. Las secciones del extremo inferior del grupo de elementos combustibles 7 de la región de siembra 2 se posicionan en una estructura del bastidor de soporte, 18, mientras que sus secciones del extremo superior se posicionan en una rejilla de guía, 19 (Figura 1). Un elemento combustible 7 de la región de siembra 2 puede fabricarse mediante el uso de la técnica de moldeado combinado (extrusión a través de un troquel hembra) en forma de una única unidad del conjunto. El paso de la línea espiral de los nervios espaciadores en espiral, 9, se seleccionó en base a la condición de la alineación mutua de los ejes de los elementos combustibles adyacentes 7 a una distancia igual al ancho de sección transversal a través de las esquinas de un elemento combustible y varía de 5 % a 30 % de la longitud del elemento combustible.

La región de capa fértil 3 contiene una estructura del bastidor, formada por cuatro elementos de ángulo 20 y cuatro polos 21, que se unen a la tobera inferior 6. Las rejillas espaciadoras 22 se aseguran a una estructura del bastidor a través de los orificios en los que van los elementos combustibles 8 (Figura 9). Las rejillas espaciadoras 22 tienen una abertura en su zona central para alojar la región de siembra 2 en la misma.

En la Figura 3 se muestra un segundo ejemplo de un conjunto combustible designado como elemento colectivo 1'. Este conjunto contiene una región de siembra 2', una región de capa fértil 3', una tobera superior 4', una tobera inferior de la región de siembra 5' y una tobera inferior de la región de capa fértil 6'. Como se muestra en la Figura 4, la región de siembra 2' contiene el grupo de elementos combustibles 7', mientras que la región de capa fértil 3' contiene el grupo de elementos combustibles 8'.

Similar al primer ejemplo de un conjunto combustible, cada uno de los elementos combustibles 7' tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral 9 (Figura 6) a lo largo de la longitud del elemento combustible y contiene un núcleo 10 (Figura 7), que incluye uranio o plutonio enriquecido, así como también un revestimiento 11, hecho de una aleación de zirconio que rodea el núcleo. El flotador 12 se localiza dentro del núcleo 10. Cada uno de los elementos combustibles 8' tiene una forma redonda en la vista en planta y se fabrica a partir de varias formulaciones cerámicas de torio y uranio.

El módulo de elementos combustibles 7' y 8' se disponen en las hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas en la sección transversal, de manera que el conjunto combustible en su totalidad tiene la forma de un cuadrado en la vista en planta. En particular, los elementos combustibles de la región de siembra 7' y la región de capa fértil 8' se disponen a lo largo de 17 hileras y 17 columnas de una red de coordenadas cuadradas, en la que los elementos combustibles 7' se disponen en 11 hileras y 11 columnas en esta sección media de la rejilla.

Los perfiles de los elementos combustibles 7', posicionados en las hileras y columnas más exteriores de una red de coordenadas cuadradas, tienen un ancho idéntico a través de las esquinas, que asciende, por ejemplo, a 10,3 mm. Los perfiles de los elementos combustibles restantes 7' tienen un ancho idéntico y mayor a través de las esquinas, que asciende, por ejemplo, a 12,6 mm. El número de elementos combustibles 7', posicionados en las hileras y columnas más exteriores de la red de coordenadas cuadradas es 36 (9 en cada hilera y columna de la red de coordenadas cuadradas), mientras que el número de los elementos combustibles restantes 7' es 72. Los elementos combustibles 8' tienen un diámetro idéntico que equivale, por ejemplo, a 9,5 mm, y se disponen en tres hileras y columnas de una red de coordenadas cuadradas. El número de elementos combustibles 8' es 156.

Similar al primer ejemplo de un conjunto combustible, un tubo 13 se localiza en el centro de la región de siembra 2' que forma un canal de guía para alojar los controles en el mismo. Algunos de los tubos guías 14 se localizan dentro de los confines de región de siembra 2' para la inserción de las barras absorbentes y las barras de seguridad, que se instalan en la tobera superior 4 con el fin de hacer posible el desplazamiento axial y se unen a la tobera inferior 5' de la región de siembra 2' por medio de una junta roscada 15, o un accesorio de unión 16 (Figura 8). Los tubos guías periféricos restantes 14' se localizan dentro de los confines de la región de capa fértil 3', se instalan en la tobera superior 4 para hacer posible el desplazamiento axial, y se une a la tobera inferior 6' de la región de capa fértil 3' por medio de la junta roscada 15 del accesorio de unión 16 (Figura 8).

Similar al primer ejemplo de un conjunto combustible, el grupo de elementos combustibles 7' de la región de siembra 2' está rodeado por un canal 17', que se sujeta a la tobera inferior 5'. Las secciones de extremo inferior de los elementos combustibles 7' de la región de siembra 2' se posicionan en la estructura del bastidor de soporte 18, mientras que sus secciones de extremo superior se posicionan en la rejilla de guía 19 (Figura 3).

Similar al primer ejemplo de un conjunto combustible, la región de capa fértil 3' contiene una estructura del bastidor que se forma por los tubos guías periféricos 14', para la inserción de las barras absorbentes y las barras de seguridad instaladas en la tobera superior 4, para hacer posible el desplazamiento axial. Las rejillas espaciadoras 22 se unen a la estructura del bastidor, a través de las aberturas, a través de las cuales van los elementos combustibles 8' (Figura 9). Las rejillas espaciadoras 22 tienen una abertura en la zona central para acomodar el posicionamiento de la región de siembra 2' en la misma.

El canal 17' de la región de siembra 2' y la estructura del bastidor de la región de capa fértil 3' pueden unirse por medio de retenes, localizados en la sección superior del conjunto combustible 1', como se muestra en la Figura 3, mediante el uso un retén de bola, 23, que interactúa con un anillo de virola, 24, que se asegura a la estructura del bastidor de la región de capa fértil 3'.

Como se indicó anteriormente y como se muestra en la Figura 4, los elementos combustibles 7' de las hileras y columnas más exteriores de la red de coordenadas cuadradas de la región de siembra 2' tienen un ancho más pequeño a través de las esquinas que el de los elementos combustibles restantes 7' de la región de siembra 2'. Para estabilizar la posición relativa de los elementos combustibles 7' de los elementos combustibles dentro del canal 17', los dispositivos se posicionan en su superficie interior para limitar el movimiento lateral de los elementos combustibles 7'.

La disposición de los elementos combustibles en la región periférica de una región de siembra del segundo ejemplo se representa en la Figura 5. Todos los elementos combustibles 7' hacen contacto con cada elemento combustible adyacente en el grupo 7' en los puntos tangentes de los nervios espaciadores en espiral 9, que están separados entre sí en la dirección axial a una distancia igual al 25 % del valor de paso de la línea espiral. Los puntos donde los elementos combustibles 7' hacen contacto con el canal 17' de la región de siembra 2' pueden localizarse en las regiones de las áreas elevadas 25 (en las áreas deformadas del canal 17'), como se muestra en la parte derecha de la Figura 5. Las varillas espaciadoras, 26, pueden usarse como una alternativa, como se muestra en la parte superior de la Figura 5, que se disponen en la dirección axial y se unen a la tobera inferior 6'. Las líneas continuas y discontinuas en la Figura 5 representan los perfiles cuatrilobulados de los elementos combustibles 7' en diferentes secciones transversales para ilustrar las localizaciones de estos puntos de contacto.

Los ejemplos de conjuntos combustibles tienen elementos combustibles de la región de siembra con un núcleo 10, que incluye uranio o plutonio enriquecido. El núcleo 10 se fabrica principalmente de una aleación de uranio-zirconio (U-Zr), donde la fracción de uranio en el compuesto combustible es de hasta el 30 %, con un enriquecimiento de isótopo de uranio-235 de hasta el 20 %, o de una aleación de plutonio-zirconio (Pu-Zr), con una fracción de plutonio de hasta el 30 %. El flotador 12, posicionado a lo largo del eje longitudinal del núcleo 10, tiene una forma de sección transversal prácticamente cuadrada. El paso de la línea en espiral de los nervios espaciadores en espiral 9, equivalen a 5 % - 30 % de la longitud del elemento combustible.

El núcleo del reactor tiene la misma configuración y dimensiones geométricas que en un reactor de agua ligera convencional del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.), de manera que este reactor puede volver a equiparse con conjuntos de este tipo y puede crearse un núcleo a partir del número requerido de conjuntos combustibles. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de un núcleo del reactor de agua ligera 27 que en general tiene una sección transversal redonda y varios conjuntos combustibles, cada uno de los cuales tiene una sección transversal cuadrada.

El conjunto combustible 1 del primer ejemplo se ejecuta en la siguiente secuencia. Los elementos combustibles 7, el tubo 13 y los tubos guías 14 se posicionan en la estructura del bastidor de soporte inferior 18 de la región de siembra 2. La estructura del bastidor de soporte 18 se asegura a la tobera inferior 5 de la región de siembra 2. Los extremos superiores de los elementos combustibles 7, el tubo 13 y los tubos guías 14 se posicionan en la rejilla de guía superior 19. A partir de ahí, el canal 17 se desliza sobre el grupo de elementos combustible, y se sujeta a la tobera inferior 5 y la rejilla de guía 19. La tobera superior 4 se instala en el extremo superior del tubo 13 y los extremos superiores de los tubos guías 14, luego el tubo 13 y los tubos guías 14 se aseguran en la tobera superior 4 lo que hace posible el movimiento axial.

- Una estructura del bastidor de soporte, formada por elementos de ángulo 20 y los polos 21, sobre los cuales se localizan las rejillas espaciadoras 22, se asegura a la tobera inferior 6 de la región de capa fértil 3. Los elementos combustibles 8 de la región de capa fértil 3 se posicionan en las rejillas espaciadoras 22. A partir de ahí, la tobera superior 4 y la región de siembra 2, que contiene los elementos combustibles 7, que se conectan a la tobera superior por medio del tubo 13 y los tubos guías 14, se insertan en la abertura de las rejillas espaciadoras 22, con lo cual las secciones inferiores del tubo 13 y los tubos guía periféricos 14, pasan a través de la tobera inferior 6 de la región de capa fértil y subsecuentemente se aseguran, mediante el uso una junta roscada 15, o un accesorio de unión 16. Por lo tanto, la región de siembra 2 y la región de capa fértil 3 se unen entre sí.
- El conjunto combustible agregado 1 se instala en el núcleo del reactor 27.
- Después se retira el conjunto combustible 1' del núcleo del reactor 27, el conjunto combustible 1 se desmonta en orden inverso.
- El conjunto combustible 1' del segundo ejemplo se ejecuta de diferentes maneras, en dependencia del método, usado para el anclaje relativo de la región de siembra 2' y la región de capa fértil 3'.
1. Si se usa un retén de bola 23, este se sujeta al canal 17'. La región de siembra adicional 2' se ejecuta de manera similar a la región de siembra 2 en el primer ejemplo. El grupo de elementos combustibles 7', el tubo 13 y los tubos guías 14 se posicionan en la estructura del bastidor de soporte inferior 18 de la región de siembra 2'. La estructura del bastidor de soporte 18 se asegura a la tobera inferior 5' de la región de siembra 2'. Los extremos superiores del grupo de elementos combustibles 7', el tubo 13 y los tubos guías 14, se posicionan en la rejilla de guía superior 19. A partir de ahí, el canal 17' se desliza sobre el grupo de elementos combustibles, con lo cual se asegura a la tobera inferior 5' y a la rejilla de guía 19. La tobera superior 4 se instala en el extremo superior del tubo 13 y los extremos superiores de los tubos guías 14, con lo cual el tubo 13 y los tubos guías 14, se aseguran para hacer posible el movimiento axial.
- Los tubos guías periféricos 14' se instalan en la tobera inferior 6 de la región de capa fértil 3' y las rejillas espaciadoras 22 se sujetan a los tubos guías 14'. Las rejillas 22 forman la estructura del bastidor de la región de capa fértil 3'. Los elementos combustibles 8 de la región de capa fértil 3' se posicionan en las rejillas espaciadoras 22 y en el anillo de virola 24.
- A partir de ahí, la tobera superior 4 y la región de siembra 2', que contiene los elementos combustibles 7', la cual se conecta a la tobera superior por medio del tubo 13 y los tubos guías periféricos 14' se insertan en la abertura de las rejillas espaciadoras 22 y los tubos guías 14' se aseguran dentro de la tobera superior 4, para hacer posible el movimiento axial. El retén de bola 23 garantiza el anclaje relativo de la región de siembra 2' y la estructura del bastidor de la región de capa fértil 3'.
- El conjunto combustible agregado 1 se instala en el núcleo del reactor 27.
- Después que se retira el conjunto combustible 1' del núcleo del reactor 27, este se desmonta en orden inverso.
2. Si se usa una junta roscada o un accesorio de unión, el conjunto combustible 1' se junta y se desmonta de manera similar a como se ensambla/desmonta el conjunto combustible en el primer ejemplo; es decir, la tobera inferior 5 de la región de siembra 2' y la tobera inferior 6 de la región de capa fértil 3' se interconectan por medio de una junta roscada 15 o un accesorio de unión 16.
- En el núcleo del reactor 27, los conjuntos combustibles 1 y 1' funcionan de manera similar a la manera en que esto ocurre en los reactores conocidos del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.).
- El uso del conjunto combustible de los ejemplos descritos anteriormente permite garantizar que se logre la conservación del uranio natural debido a la presencia de un componente torio (la región de capa fértil) en el diseño del conjunto combustible, ya que un combustible nuclear secundario en la forma de uranio-233 se acumula en el transcurso del proceso de quemado del torio, la combustión del cual hace una contribución significativa a la generación de energía de un núcleo que contiene conjuntos de este tipo. Esto resulta en la mejora de las características de no proliferación y en la simplificación del problema de manejo de los conjuntos combustibles gastados, ya que la acumulación del combustible nuclear secundario (un plutonio adecuado para fabricar armas nucleares) que es tradicional para los reactores PWR (por ejemplo, 1000, el EPR, etc.) se reduce en gran medida (en un 80 %), mientras que el nuevo combustible nuclear secundario - uranio-233 (o más precisamente, la porción del mismo que queda después de su combustión en una región de capa fértil de torio "in situ") - no es adecuado para fabricar armas nucleares debido a su contaminación por un isótopo de uranio-232 e incluso isótopos de plutonio. En la presente, es posible simplificar el problema de manejo de los conjuntos combustibles gastados por medio de la reducción de volúmenes de desecho través de un aumento en la vida útil del combustible especificado y a través de una disminución en el contenido de isótopos con toxicidad de radiación a largo plazo en el combustible descargado.
- El diseño de un conjunto combustible de acuerdo con los ejemplos descritos anteriormente facilita su uso en reactores del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.) debido a su compatibilidad mecánica, hidráulica y neutrónica con los diseños del conjunto combustible estándar.

Lo siguiente garantiza la compatibilidad mecánica con el conjunto combustible estándar de un reactor PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.):

- 5
 - la presencia de una estructura del bastidor de carga que garantiza la resistencia a la deformación durante la operación prolongada y cuando alto consumo de combustible, junto con la naturaleza idéntica de las dimensiones de la conexión;
 - el uso de tobera inferior, tobera superior, y los diseños de la estructura del bastidor de carga que son compatibles con los de los componentes similares de conjuntos combustibles estándares, y;
 - la compatibilidad del diseño de la región de siembra con los diseños de controles y dispositivos de recarga estándares.
- 10 Todas las características hidráulicas de un conjunto combustible según los ejemplos descritos anteriormente están en virtual acuerdo con las de un conjunto combustible estándar debido a la presencia de un sistema de dos canales paralelos, formados por las regiones de siembra y de capa fértil que se unen por distribución común (descarga) y retorno de la tobera superior. En la presente, las regiones de siembra y de capa fértil se interrelacionan hidráulicamente dentro de las secciones de entrada inferior y de salida superior. Esta ejecución del conjunto combustible garantiza que la resistencia del núcleo de un reactor del tipo PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.) con los conjuntos combustibles descritos anteriormente permanezca en el nivel del valor estándar. Por lo tanto, la instalación de los conjuntos combustibles descritos anteriormente en un reactor PWR (por ejemplo, el AP-1000, el EPR, etc.) no conduce a un cambio en el régimen de flujo refrigerante en el circuito primario del reactor. Aquí, la relación de resistencia hidráulica entre la entrada del conjunto, la sección de núcleo de la región de capa fértil y la salida del conjunto en los conjuntos combustibles descritos anteriormente y en un conjunto combustible estándar están cerca, lo que garantiza la compatibilidad hidráulica de los conjuntos combustibles descritos anteriormente con los conjuntos estándares, así como también la ausencia de fugas de refrigerante no convencionales (adicionales) entre ellos. Esto hace posible usar algunos de los conjuntos combustibles descritos anteriormente en un reactor al mismo tiempo que se usan los conjuntos combustibles del reactor estándar.
- 15
- 20
- 25 Lo siguiente garantiza la compatibilidad física de los neutrones con un conjunto combustible estándar:
 - la vida útil especificada hasta el agotamiento se logra a través del uso de compuestos combustibles especialmente seleccionados y compuestos que contienen un absorbente consumible;
 - la energía estándar de un conjunto combustible se logra a través del uso de contenidos de carga combustible especialmente seleccionados en los compuestos combustibles de la región de siembra y de capa fértil;
 - 30 - la satisfacción de los requisitos que regulan la no uniformidad del perfil de liberación de energía se logra a través del uso de contenidos de carga combustible especialmente seleccionados en las diversas hileras de los elementos combustibles de la región de siembra y el contenido de carga combustible en la región de capa fértil;
 - la retención de los efectos de reactividad dentro del intervalo, típico de los conjuntos combustibles estándares, se logra a través del uso de características de compuestos combustibles especialmente seleccionadas, y
 - 35 - la compatibilidad del diseño del conjunto combustible de dos secciones con una disposición del canal de combustible estándar (tubo) para alojar los controles garantiza la posibilidad de la regulación del nivel de energía y la descarga de energía mediante controles estándares.
- 40 Una ventaja de los conjuntos combustibles descritos anteriormente es también el hecho de que un conjunto combustible de dos secciones es desmontable, lo que hace posible garantizar una carga modular independiente de la región de siembra. La carga modular más frecuente de la región de siembra hace posible crear condiciones más favorables (en cuanto al equilibrio de neutrones y la duración de la irradiación) para el torio, colocado en una región de capa fértil del conjunto.
- 45

Reivindicaciones

1. Un elemento combustible (7) para su uso en un conjunto combustible (1) de un reactor nuclear, el elemento combustible (7) que comprende:
 5 un núcleo (10) que tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral (9) que incluyen uranio o plutonio enriquecido; y
 un revestimiento (11) que encierra el núcleo (10);
 en donde el elemento combustible tiene un perfil cuatrilobulado que incluye los nervios espaciadores en espiral (9), y los nervios espaciadores en espiral (9) tienen un paso de torsión axial de entre 5 % y 30 % de la longitud del
 10 elemento combustible (7);
 caracterizado porque el núcleo comprende una aleación de uranio-zirconio (U-Zr), con una fracción de uranio de 30 % o menos; con el uranio enriquecido hasta 20 % o menos por un isótopo de uranio-235.
2. Un elemento combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el revestimiento comprende aleación de zirconio.
3. Un elemento combustible de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el elemento combustible se fabrica en forma de una única unidad del conjunto por extrusión a través de un troquel hembra.
4. Un elemento combustible de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende además un flotador (12) que se posiciona a lo largo de un eje longitudinal del elemento combustible.
5. Un elemento combustible de acuerdo con la reivindicación 4, en donde el flotador comprende zirconio o una aleación del mismo.
6. Un elemento combustible de acuerdo con la reivindicación 4 o 5, en donde el flotador tiene una forma de sección transversal cuadrada que define cuatro esquinas.
7. Un elemento combustible de acuerdo con la reivindicación 6, en donde los lóbulos del elemento combustible definen puntas, y las cuatro esquinas de la forma de sección transversal cuadrada del flotador se localizan en los ejes que pasan a través de las puntas de los lóbulos.
8. Un elemento combustible de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4 a 7, en donde en una sección transversal del elemento combustible que es perpendicular al eje longitudinal, el núcleo rodea el flotador.
9. Un método para fabricar un elemento combustible (7) para su uso en un reactor nuclear, el método que comprende fabricar el elemento combustible (7) usando una técnica de moldeado combinada por extrusión a través de un troquel hembra en forma de una única unidad del conjunto para formar el elemento combustible (7) que comprende un núcleo (10) y un revestimiento (11);
 40 en donde, después de dicha extrusión, el núcleo (10) tiene un perfil cuatrilobulado que forma nervios espaciadores en espiral (9) que comprende uranio o plutonio enriquecido;
 en donde, después de dicha extrusión, el revestimiento (11) encierra el núcleo (10);
 en donde, después de dicha extrusión, los nervios espaciadores en espiral (9) tienen un paso de torsión axial de entre 5 % y 30 % de una longitud del elemento combustible (7);
 45 caracterizado porque el núcleo comprende una aleación de uranio-zirconio (U-Zr), con una fracción de uranio de 30 % o menos; con el uranio enriquecido hasta 20 % o menos por un isótopo de uranio-235.
10. Un método de acuerdo con la reivindicación 9, en donde el revestimiento comprende aleación de zirconio.
11. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 o 10, que comprende además formar un flotador (12) posicionado a lo largo de un eje longitudinal del elemento combustible.
12. Un método de acuerdo con la reivindicación 11, en donde los lóbulos del elemento combustible definen puntas, y el flotador tiene una forma de sección transversal cuadrada que define cuatro esquinas que se localizan en los ejes que pasan a través de las puntas de los lóbulos.

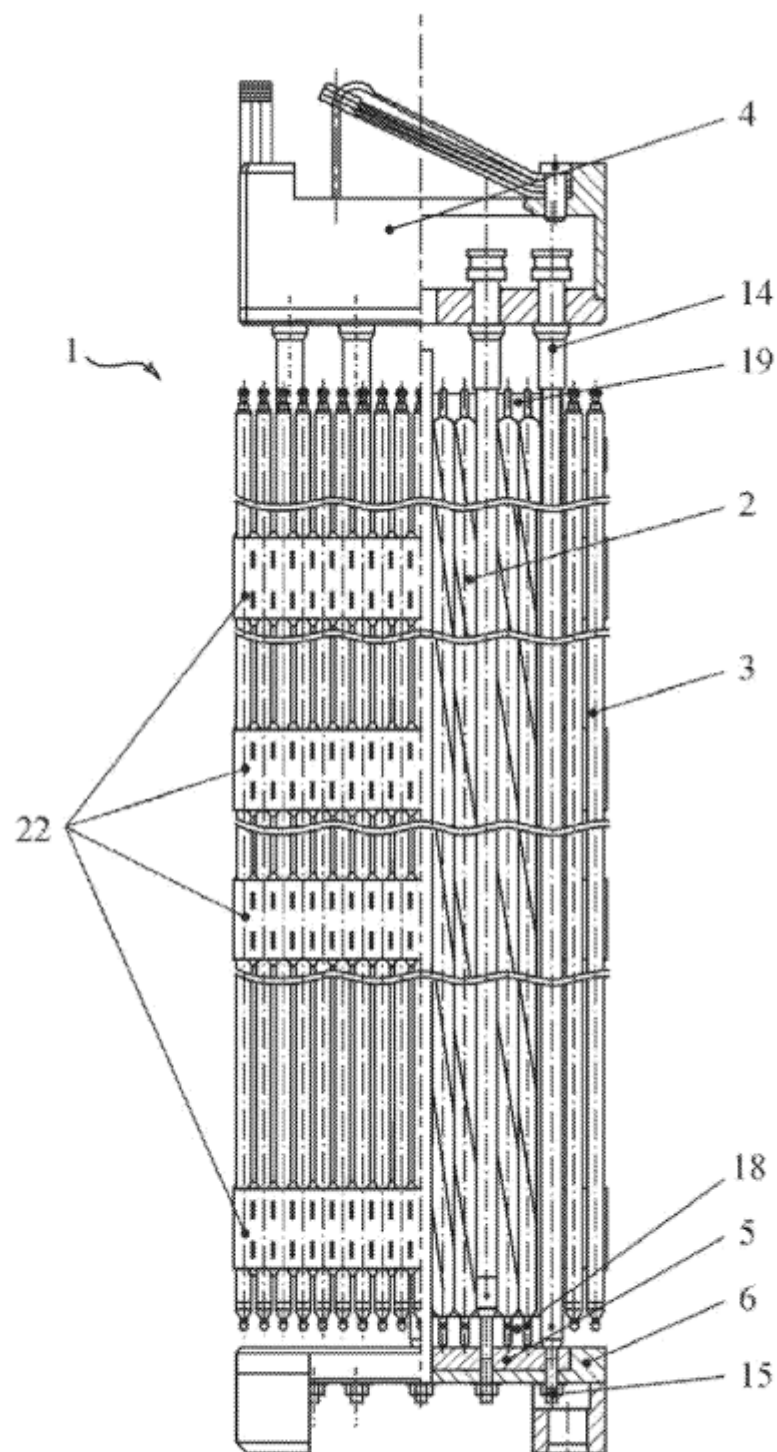


FIG. 1

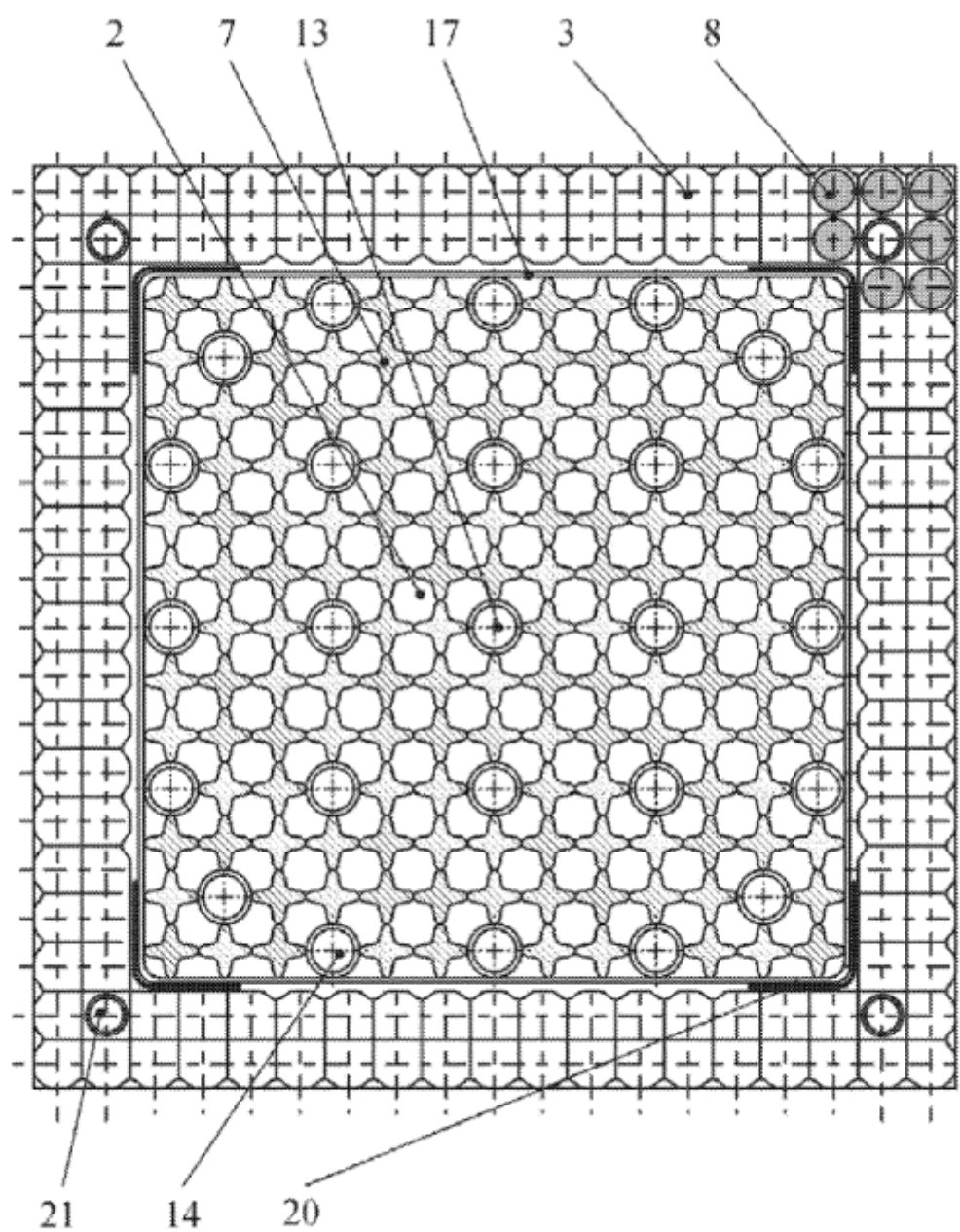
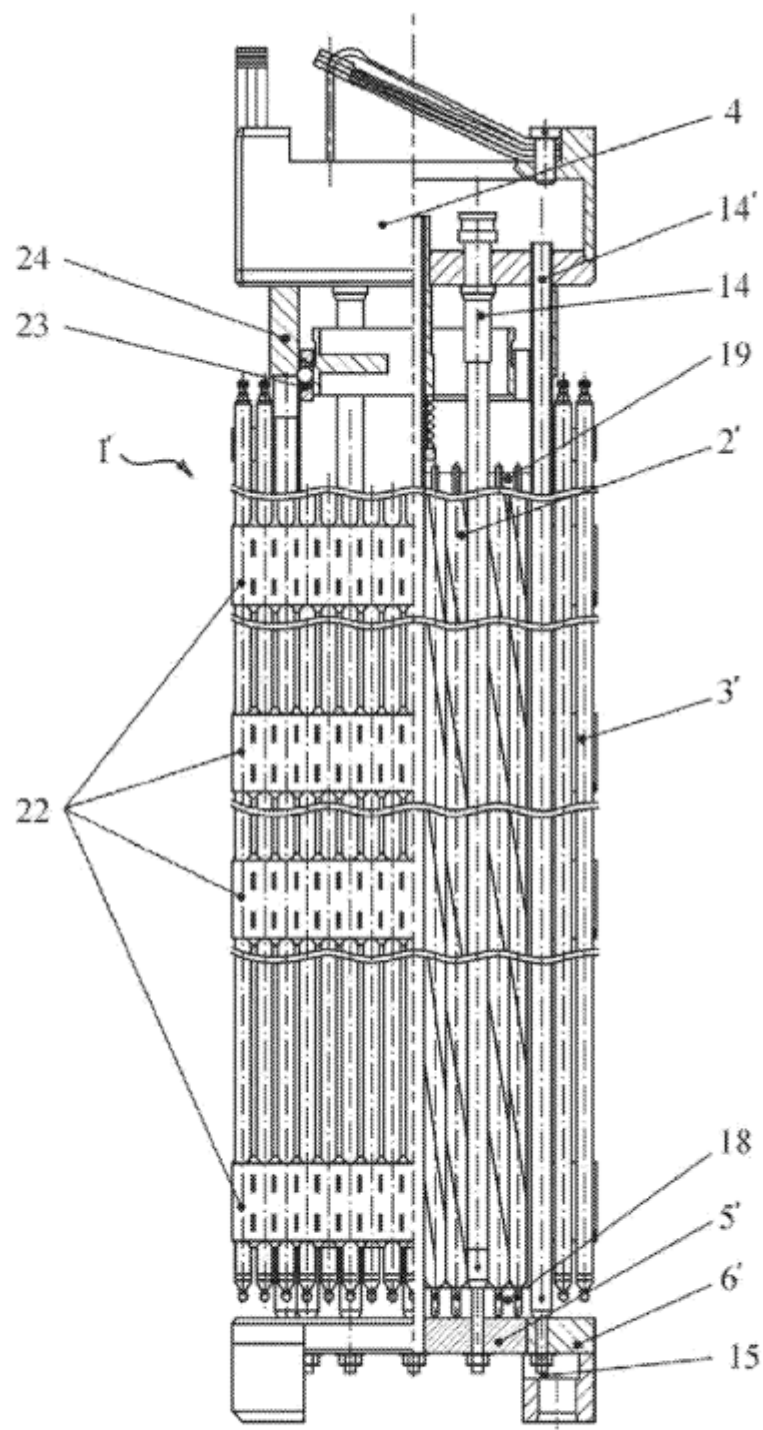


FIG. 2



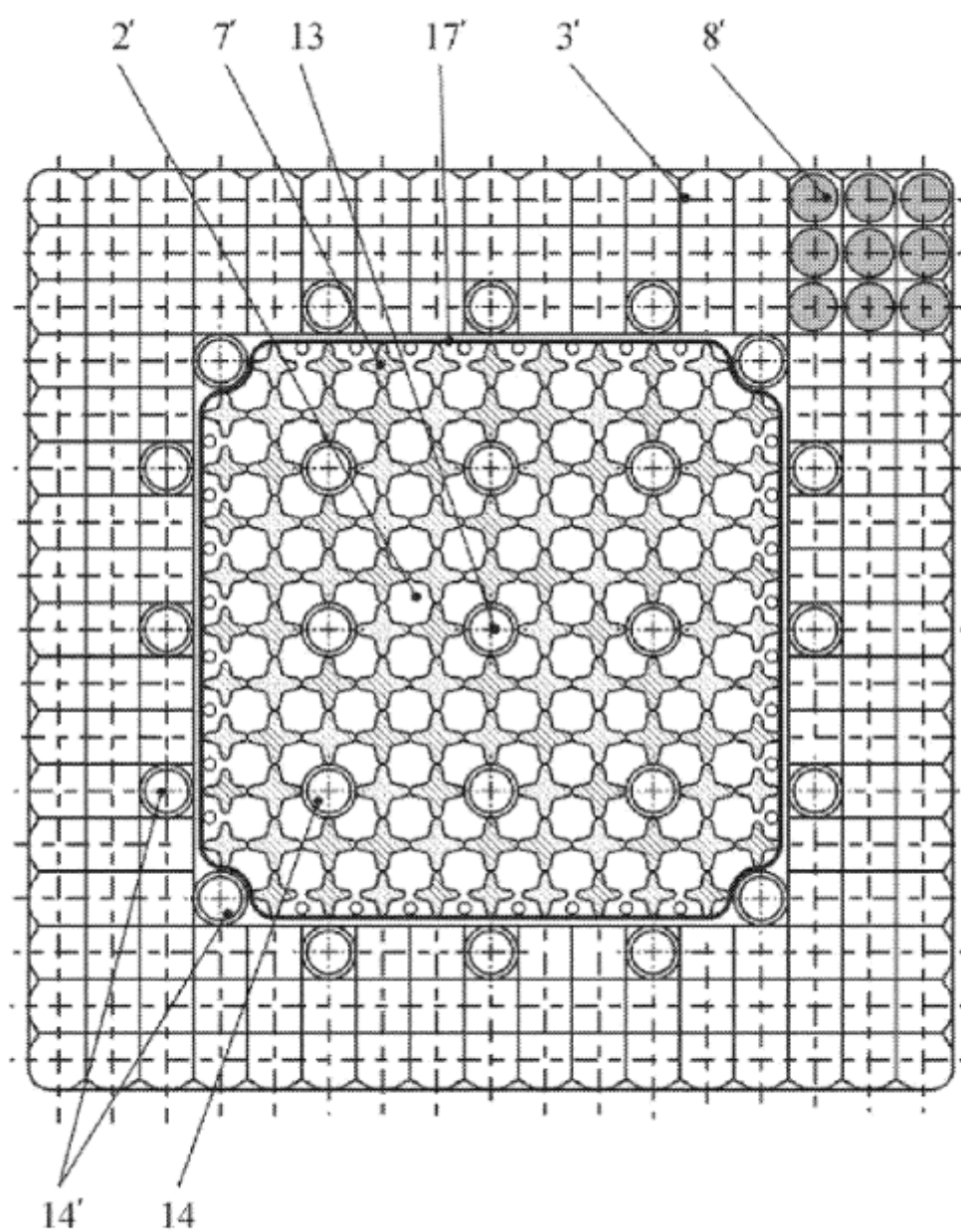


FIG. 4

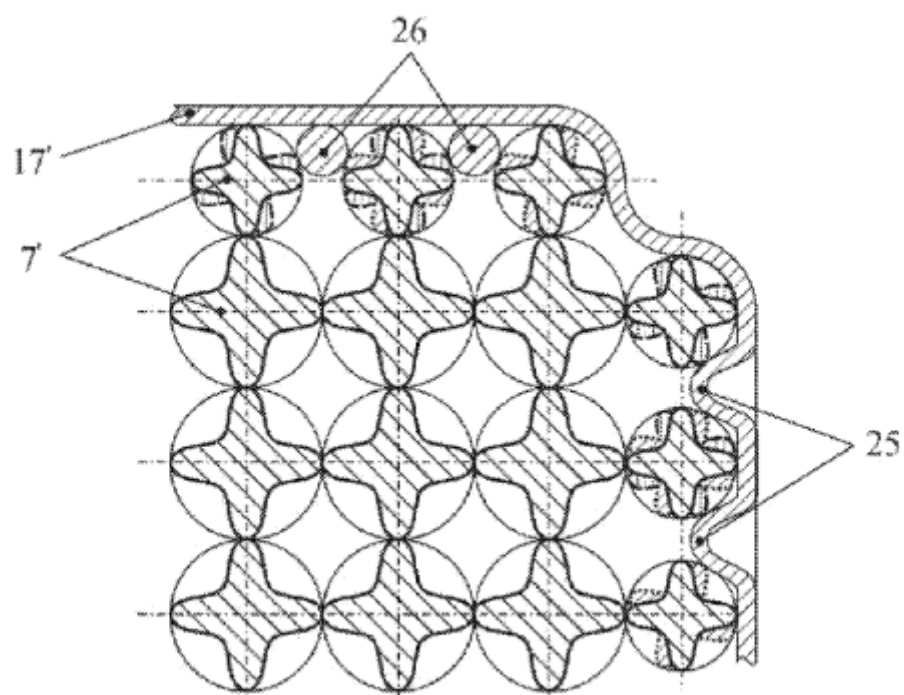


FIG. 5

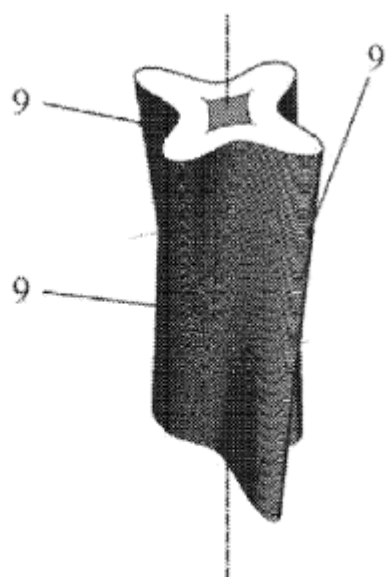


FIG. 6

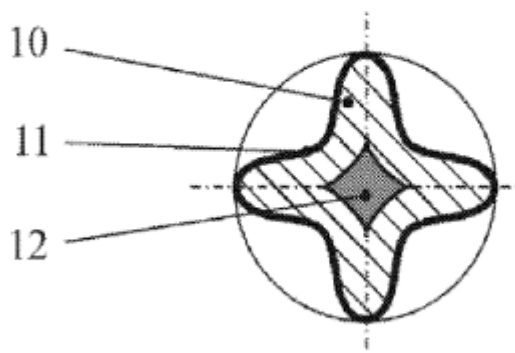


FIG. 7

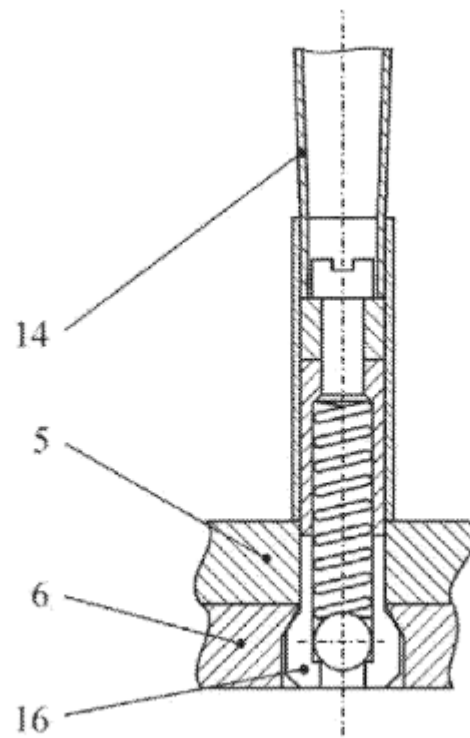


FIG. 8

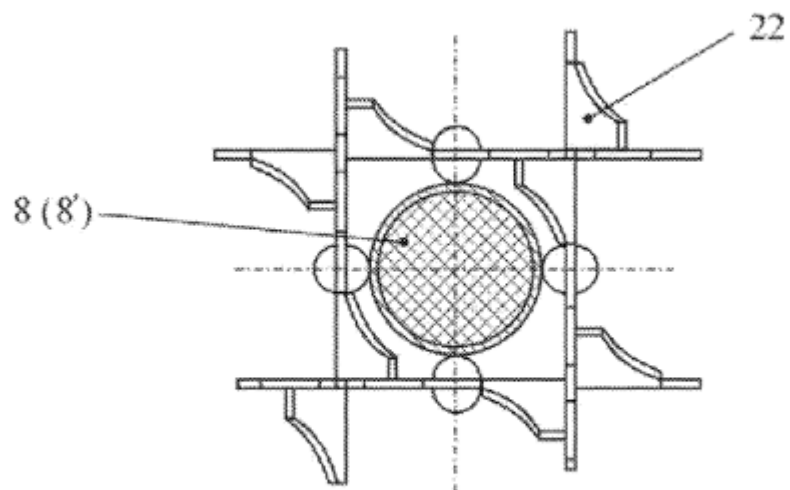


FIG. 9

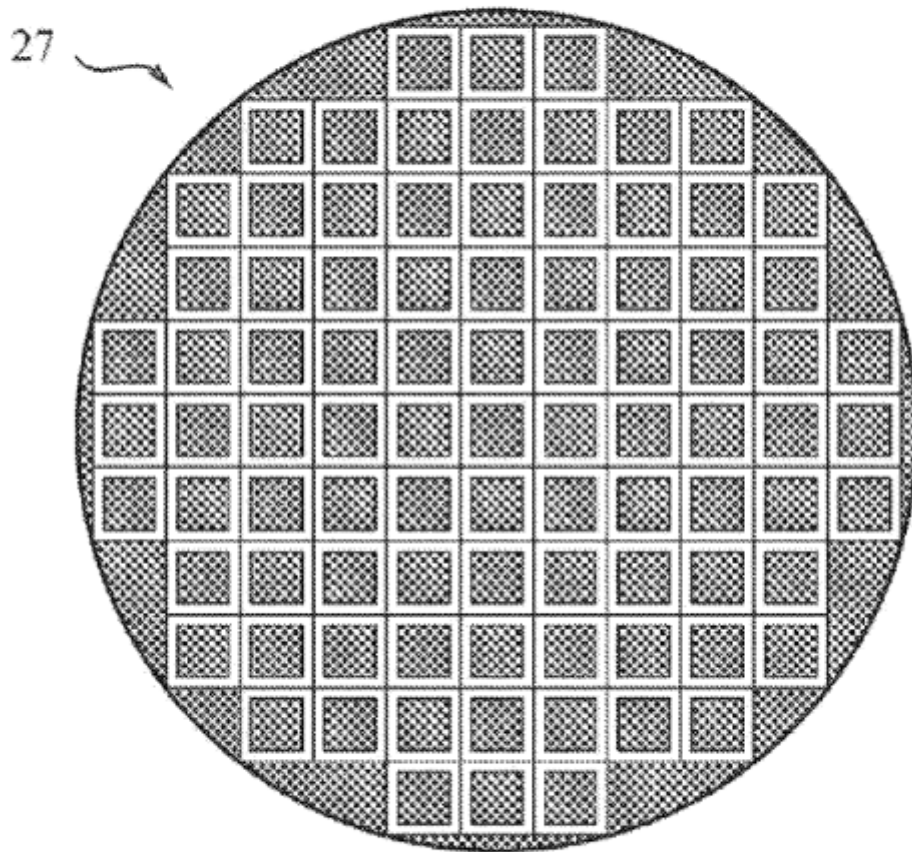


FIG. 10