

336064

25



MEMORIA DESCRIPTIVA.-
=====

PATENTE DE INVENCION.

P A I S : ESPAÑA.

DURACION : 20 AÑOS.

OBJETO : "MEJORAS INTRODUCIDAS EN LOS ELEMENTOS
"COMBUSTIBLES PARA REACTORES NUCLEARES".

=====

A nombre de : GENERAL ELECTRIC COMPANY.

Residente en : SCHENECTADY (New York) 1, River Road.

Nacionalidad : ESTADOUNIDENSE.

(P. 2.602.- CG.)
(Dkt.- 24D-858.)

25 ENE 1957

El presente invento se refiere en general a un perfeccionamiento introducido en los reactores de escisión nuclear y, más particularmente, a elementos combustibles para uso con tales reactores.

- 5.- La liberación de grandes cantidades de energía por las reacciones de escisión nuclear es, en la actualidad, ampliamente conocida. En general, un átomo escindible, tal como U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , Pu^{241} , absorbe un neutrón en su núcleo y experimenta una desintegración nuclear. Esta produce en promedio dos productos de escisión de menor peso atómico con gran energía cinética y varios neutrones, también de gran energía. Por ejemplo, la escisión del U^{235} da un producto de escisión ligero y un producto de escisión pesado con números de masa que fluctúan entre 80 y 110 y entre 125 y 155, respectivamente, y un promedio de 2,5 neutrones. La liberación de energía se aproxima a 200 mev (millones de electrón-voltios) por escisión.
- 10.-
- 15.-

- La energía cinética de los productos de la escisión se disipa rápidamente en forma de calor en el combustible nuclear. Si, después de esta generación de calor, hay al menos un neutrón neto remanente que induzca una escisión subsiguiente, la reacción de escisión se sustenta por sí misma y la generación del calor es continua. El calor es evacuado por el peso de un refrigerante en relación de intercambio térmico con el combustible. La reacción puede con-
- 20.-
- 25.-

336064

336064

25



tinuar mientras exista suficiente material escindible en el combustible para superar los efectos de los productos de la escisión y de otros absorbedores de neutrones que pueda también haber presentes.

- 30.- Con el fin de mantener tales reacciones de escisión a una velocidad suficiente para generar cantidades útiles de energía térmica, se están en la actualidad diseñando, construyendo y haciendo funcionar reactores nucleares en los cuales el material escindible está contenido en elementos combustibles que pueden tener formas diversas, tales como de placas, tubos o barras. Estos elementos combustibles están usualmente provistos sobre sus superficies exteriores con un recubrimiento no reactivo, resistente a la corrosión, que no contiene material escindible ni fértil. Los elementos combustibles se agrupan juntos a distancias fijas entre sí en un canal de circulación del refrigerante o región en forma de conjunto combustible y se combinan suficientes conjuntos combustibles para formar el núcleo del reactor capaz de la reacción automantenida a que se ha hecho referencia. Usualmente el núcleo está encerrado dentro de una cuba de reactor.

- El elemento de combustible al que se refiere principalmente el presente invento incluye un tubo alargado o funda, ya sea del tipo continuo, ya del tipo segmentado, que contiene un material escindible tal como dióxido de uranio UO_2 . Este material combustible, típicamente, tiene la forma de gránulos colocados extremo con extremo en el tubo; sin embargo, puede tener la forma de polvo o de partícula. El extremo superior del tubo incluye una cámara prevista para recoger los gases del producto de la escisión que son cedidos

- 4 - 336064



60.- por el material combustible durante el funcionamiento del reactor nuclear: Los extremos superior e inferior del tubo están cerrados respectivamente por tapones terminales superior e inferior soldados al tubo o funda para impedir que el producto gaseoso de la escisión escape del elemento combustible y para impedir que el agua entre en el tubo.

65.- Con el fin de aumentar la vida de exposición de los elementos combustibles en el reactor, es deseable reducir al mínimo las concentraciones de esfuerzos mecánicos que pueden existir en los elementos combustibles. Las concentraciones de esfuerzos mecánicos ocurren a menudo cuando hay una expansión desigual de componentes adyacentes de los elementos combustibles. En ciertos casos, esta desigual dilatación puede aceptarse disponiendo una holgura adecuada entre estos
70.- componentes. Esto puede lograrse, por ejemplo, entre la funda del elemento y los gránulos combustibles previendo una holgura que sea suficiente para permitir la expansión libre de los gránulos de combustible.

75.- Sin embargo, el enfoque anterior no es posible en aquellas regiones del elemento combustible en que no son admisibles holguras para la dilatación térmica. Tales regiones existen, por ejemplo, cuando es necesario soldar o conectar de otro modo partes compañeras. Esta situación ha existido en los elementos combustibles a los que se refiere el presente invento tanto en la región del tapón terminal inferior
80.- como en las regiones de interconexión de segmentos. Se ha visto, durante el funcionamiento del reactor, que los gránulos de combustible nuclear calentaban la funda y el tapón terminal inferior de tal modo que la temperatura media volumétrica del tapón terminal era considerablemente mayor que
85.-

336064



- temperatura media volumétrica de la funda. Por consiguiente, la dilatación radial del tapón terminal era mayor que la dilatación radial de la funda en una cuantía que era suficiente para provocar indeseables concentraciones de esfuerzos en la soldadura de interconexión. Esto condujo a la formación de grietas o aberturas en la soldadura que dejaban al descubierto el combustible y los productos de la excisión contenidos dentro de los elementos combustibles al refrigerante del reactor. Al ocurrir estas condiciones, no solamente había que reemplazar los elementos combustibles sino que el refrigerante podría llevar material radioactivo puesto en libertad por los elementos combustibles y, por tanto, contaminar diversas partes del reactor y del circuito de refrigerante. Esta diferente dilatación térmica es mayor en el extremo del combustible correspondiente a la entrada del refrigerante, puesto que esta región del elemento combustible está mantenida a la temperatura más fría. Sin embargo, existe también en las regiones de interconexión de los segmentos de un elemento combustible segmentado. Se han usado formas diversas de tapones terminales, diferentes espesores de los tubos y distintos materiales al intentar reducir al mínimo estas concentraciones de esfuerzo; sin embargo, se ha visto que el presente invento es más satisfactorio que estos enfoques alternativos.
- 90.-
- 95.-
- 100.-
- 105.-
- 110.- En pocas palabras, el presente invento proporciona un método para reducir al mínimo la expansión térmica diferente arriba descrita tanto en la región del tapón terminal inferior como en las regiones de interconexión de los segmentos. Por ejemplo, en la región del tapón terminal inferior, esto
- 115.- se logra disponiendo por lo menos un opérculo térmico entre



el gránulo de combustible inferior y el tapón terminal inferior. Esto reduce la velocidad de la transmisión de calor desde el gránulo combustible al tapón terminal inferior disminuyendo la temperatura media volumétrica del tapón terminal inferior para que sea sustancialmente igual a la temperatura volumétrica media de la funda del elemento combustible a la cual está conectado el tapón terminal inferior. Se ha visto que puede obtenerse una caída de temperatura suficiente usando opérculos térmicos hechos de metal y disponiendo todavía de una barrera térmica eficaz. Sólo existe una pequeña parte de esta caída de temperatura en los propios opérculos térmicos metálicos ya que el metal tiene una elevada conductividad térmica. Sin embargo, se cree que gran parte de la caída de temperatura es debida a las regiones o intersticios interfaciales térmicos formados respectivamente entre el gránulo de combustible y el opérculo y entre el tapón terminal inferior y el opérculo. (cuando se usan dos o más opérculos térmicos se forman regiones interfaciales térmicas entre opérculos adyacentes). Esto se base en la condición de que estas regiones interfaciales térmicas estén llenas de helio durante el funcionamiento inicial del elemento combustible en el reactor y, luego, con helio y gases de la escisión que son puestos en libertad desde el material combustible. Estos gases tienen pequeña conductividad térmica en comparación con la de los opérculos térmicos metálicos, la funda y los tapones terminales y, por tanto, las regiones interfaciales actúan como barrera térmica eficacísima.

La forma preferida del opérculo térmico del presente invento es la de un triángulo equilátero con los vértices redondeados. De preferencia, la holgura entre el opérculo y

336064



el diámetro interior del tubo del elemento combustible es relativamente pequeña. Además, los opérculos térmicos se hacen relativamente delgados de manera que pueden apilarse varios para proporcionar un número mayor de intersticios de barrera térmica llenos de gas, debido a las caras de contacto térmicas.

Además, la forma triangular del opérculo térmico se elige de tal modo que, cuando se insertan en el tubo de funda de la barra de combustible durante el ciclo de carga del combustible bajen por el tubo y descansen de plano contra el tapón terminal inferior. Debido a la forma triangular y a la holgura entre el opérculo y el diámetro interior del tubo de funda es improbable que el opérculo descansa en otra posición cualquiera que no sea la posición de plano contra la super-

ficie interior del tapón terminal. Esto asegura alturas constantes de la columna de combustible dentro de cada elemento combustible, ya que el gránulo de combustible inferior no quedará excesivamente espaciado del tapón terminal inferior como ocurriría si el opérculo viniera a descansar en posición vertical o inclinada. Esto impide también que se rompa el gránulo de combustible lo cual podría ocurrir si el gránulo inferior choca contra el opérculo térmico que está en una posición vertical o inclinada durante la operación de carga.

El invento se comprenderá mejor haciendo referencia a la descripción siguiente tomada conjuntamente con los dibujos adjuntos, en los cuales:

La figura 1 es una vista isométrica, en sección parcial, de un conjunto de combustible que incorpora los elementos combustibles hechos de acuerdo con el presente invento.

La figura 2 es un alzado lateral, en sección parcial,



de un elemento de combustible segmentado que incorpora los opérculos térmicos hechos de acuerdo con el presente invento.

180.- La figura 3 es una vista en corte a escala ampliada del extremo inferior de un elemento de combustible que no incorpora los opérculos térmicos

185.- La figura 4 es un diagrama de temperatura que ilustra las características de temperatura del gránulo de combustible inferior, del tapón terminal inferior y de la funda asociada del elemento de combustible de la figura 3.

La figura 5 es una vista en corte a escala ampliada del extremo inferior del elemento de combustible de la figura 2 e incluye los opérculos térmicos hechos de acuerdo con el presente invento.

190.- La figura 6 es un diagrama de temperatura que ilustra las características de temperatura del gránulo inferior de combustible, del tapón terminal inferior y de la funda asociada del elemento combustible y de los opérculos térmicos de la figura 5.

195.- La figura 7 es una vista en corte a escala ampliada dada por la línea 7-7 de la figura 5.

La figura 8 es una vista en planta desde arriba de un opérculo térmico hecho de acuerdo con el presente invento.

200.- La figura 9 es un alzado lateral del opérculo térmico mostrado en la figura 8.

Las figuras 10A a 10D ilustran la secuencia de carga de los opérculos térmicos en el elemento combustible durante el montaje.

205.- En la figura 1 se ilustra un conjunto combustible típico que incorpora los elementos combustibles hechos de acuer-



do con el presente invento. El conjunto combustible 10 consiste en general en el canal de circulación tubular 12 de extremos abiertos, los elementos combustibles 14, la placatirante inferior 16, la placatirante superior 18 y los dispositivos espaciadores 20 de los elementos combustibles. El canal tubular 12 tiene una sección sustancialmente cuadrada, teniendo la extremidad superior miembros de esquina 22 que soportan el canal después de que ha sido insertado sobre los elementos combustibles. Los elementos combustibles 14 se extienden a través de una pluralidad de elementos espaciadores 20 y están soportados por ellos en relación espaciada, descansando estos separadores contra la superficie interior del canal tubular 12. Estos dispositivos espaciadores de los elementos combustibles están separados entre sí en una distancia predeterminada a lo largo del haz, por ejemplo, en 45 cm., y están conectados a uno o más de los elementos combustibles para impedir su movimiento longitudinal. Estas conexiones pueden lograrse por medios diversos, tal como la fijación de dispositivos de bloqueo a estas mismas distancias predeterminadas. Describiremos en lo que sigue un ejemplo de tal disposición con respecto al elemento combustible segmentado que se muestra en la figura 2.

Cada elemento combustible 14 comprende un tubo alargado que contiene un material combustible excindible, tal como dióxido de uranio enriquecido UO_2 . El material combustible tiene típicamente la forma de gránulos de gran densidad colocados extremo contra extremo en el tubo; sin embargo, puede tener la forma de polvo o de partículas de gran densidad, que están densificados a una densidad aparente que se aproxima a la densidad teórica del material. Cada extremo del tubo está

336064



cerrado por medio de un tapón terminal para impedir que el refrigerante toque al combustible y para impedir que los productos de la escisión escapen del elemento combustible. Como se ha ilustrado en la figura 1, hay una pluralidad de tales elementos combustibles y, en una disposición típica, todos estos elementos combustibles, salvo uno, consistirán en tubos continuos no segmentados. Sin embargo, uno de los elementos combustibles, situado típicamente cerca del centro del haz, estará segmentado e incluirá dispositivos de bloqueo en cada conexión para coger en sus posiciones apropiadas los dispositivos espaciadores 20.

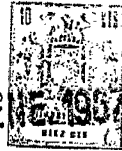
Los extremos inferiores de los elementos combustibles están soportados por la placa-tirante inferior 16 y coinciden con alvéolos 24 que están formados en parte del grueso de la placa-tirante. Unas aberturas 26 están situadas junto a estos alvéolos 24 y comunican directamente con la abertura inferior 28. El extremo inferior del canal tubular 12 ajusta por abajo en torno del extremo superior de la placa-tirante. El extremo inferior de la placa-tirante tiene un herraje de transición estrechado que termina en una pieza de morro abierta 29 de sección circular y está soportado por la estructura interna del reactor. Cuando el conjunto de combustible se monta en el reactor, la abertura inferior 28 comunica con una cámara de alimentación que contiene una reserva de un refrigerante, tal como agua. Varios elementos combustibles, tales como los denotados por el número de referencia 30, están situados en las esquinas y tienen prolongaciones roscadas que se extienden a través de la placa-tirante superior 18 y están aseguradas a la placa por medio de tuercas 32. Unos alvéolos 34 de soporte de las barras combustibles

25 ENE 1967

336064

están formados a través de la placa-tirante superior y reciben los extremos superiores de las barras combustibles. Están dispuestos unos muelles de compresión 36 para mantener una carga que viene determinada por el par aplicado a las tuercas 32 entre la placa-tirante superior 18 y el resalte superior de los elementos combustibles 14. Están previstas unas aberturas 38 en la placa-tirante superior 18, entre los alvéolos 34 que reciben los extremos de los elementos combustibles, para poner en comunicación el interior del conjunto combustible con la cámara de descarga del reactor. El canal tubular 12 está mantenido en su sitio por tornillos 40 que están insertados a través de aberturas previstas en los miembros de esquina 22, las cuales coinciden con prolongaciones roscadas 41 de la placa-tirante superior 18. La placa-tirante superior 18 está también provista de una empuñadura 42 que se emplea para subir y bajar el conjunto combustible 10.

Aún cuando el conjunto combustible descrito en lo que antecede puede usarse en diversos tipos de reactores nucleares, está particularmente adaptado para su empleo con reactores nucleares del tipo moderador-refrigerante de agua hirviente. Durante el funcionamiento de un reactor típico de agua hirviente en el cual puede emplearse el conjunto combustible, el refrigerante es introducido por la abertura inferior 28, a través de las aberturas 26 y sube por dentro del canal 12 donde rodea las superficies exteriores de los elementos combustibles 14 y fluye longitudinalmente a lo largo de ellas. A medida que sube el refrigerante, sustrae calor de los elementos combustibles y, por tanto, aumenta su temperatura y, finalmente, se convierte en vapor húmedo que tiene una calidad del 10%, por ejemplo. Este vapor húmedo pasa



luego por las aberturas 38 de la placa-tirante superior 18 y se descarga en una cámara de descarga dentro del reactor. La cámara de descarga recibe vapor húmedo de una pluralidad de conjuntos combustibles que componen el núcleo del reactor. El vapor húmedo procedente de la cámara de descarga es secado luego y transmitido a un dispositivo consumidor del vapor, tal como una turbina. El vapor condensado procedente del dispositivo consumidor de vapor puede devolverse entonces a la cámara de alimentación antes mencionada.

300.-

305.- En la figura 2 se ilustra el elemento combustible segmentado 14' hecho de acuerdo con el presente invento. Este elemento combustible segmentado consiste en una pluralidad de segmentos 43 que están interconectados por conectadores 44. Cada segmento incluye un tubo de funda 45 cilíndrico y alargado. Este tubo puede hacerse de muchos materiales diferentes; sin embargo, se hace preferiblemente de circonio, ya que este material tiene una baja sección de captura de neutrones. El extremo superior del elemento combustible está cerrado por medio del tapón terminal superior 46 y el tapón terminal inferior 48, pudiendo estar hechos también ambos de circonio. Estos tapones terminales se sueldan respectivamente a los extremos opuestos del tubo de funda del elemento combustible 14' para impedir que el refrigerante del reactor toque el combustible y para impedir que los productos de la excisión escapen del elemento combustible. Dispuesto dentro del tubo 45 de cada uno de los segmentos hay un material combustible, tal como dióxido de uranio. El combustible ilustrado en el elemento de combustible de la figura 2 tiene la forma de gránulos 50 colocados extremo contra extremo en el tubo. Ha de entenderse, sin embargo, que el combustible puede

310.-

315.-

320.-

325.-



ser de cualquier tipo empleado en reactores nucleares, tal como de polvo o en partículas.

El elemento combustible 14' está provisto también de una cámara 54 que recoge los gases de los productos de escisión cedidos por el combustible nuclear durante el funcionamiento del reactor. El volúmen de esta cámara se hace bastante grande para acomodar a presión razonable gases producidos en la escisión que, es de esperar, sean puestos en libertad por el combustible durante su ciclo de vida calculado en el reactor nuclear. Un muelle 56 está dispuesto en la cámara 54 y obliga a los gránulos 50', del segmento superior, a hacer contacto facial uno contra otro y, típicamente, ejerce una fuerza de unos 2,5 kg. Este muelle, de preferencia, está hecho de Inconel-X, acero u otro material que tenga características elásticas adecuadas y, con preferencia, tiene una configuración helicoidal, siendo el diámetro exterior menor que el diámetro interior del tubo. Previéndose sólo una pequeña holgura entre el muelle y el tubo, el muelle puede ayudar a soportar el tubo adyacente contra las altas presiones que podrían ser ejercidas contra la superficie exterior del tubo por el medio circundante que está dentro del reactor. Se inserta un opérculo circular plano 58 entre el extremo inferior del muelle 56 y el extremo superior del gránulo 50' para impedir que las partículas o fragmentos de combustible entren en la cámara y para distribuir uniformemente la carga del muelle contra el gránulo inferior.

Los conectadores 44 tienen en general sección circular y tienen una sección central cilíndrica 60 con un diámetro exterior aproximadamente igual al diámetro exterior del tubo 45 e incluyen dos collarines espaciados, en general cuadrados, 62

336064



1967

y 64, que forman una ranura 66 entre ellos. La sección exterior de cada una de las cuatro esquinas de cada uno de los collarines ha sido eliminada, como se muestra en la sección A-A de la figura 2, para permitir la inserción en el espaciador antes-mencionado. La rotación de la barra de combustible segmentada en un ángulo fijo, por ejemplo, de 45°, hace que las ranuras 66 cojan partes correspondientes de los espaciadores asociados y bloqueen de este modo en su sitio a los espaciadores. Extendiéndose desde la sección central 60 hay secciones troncocónicas 68 y 70 que están insertadas en los tubos 45 de segmentos adyacentes 43. Está prevista una abertura 72 en los conectadores 44 para permitir la circulación de los gases de la escisión desde los diversos segmentos a la cámara 54 y para igualar la presión en el elemento combustible.

Un aspecto importante del presente invento se refiere a la asociación singular entre el tapón terminal inferior 48, el extremo inferior del tubo segmentado 45' de abajo, los opérculos térmicos 102 y 102' y el refrigerante que circula a lo largo de la superficie exterior del elemento combustible como se indica con las flechas de trazos de la figura 2. Con referencia a las figuras 2 y 5, el tapón terminal 48 está formado integralmente e incluye un cuerpo cilíndrico alargado 76 que tiene un extremo biselado 78 para insertarlo fácilmente en los receptáculos 24 de la placa-tirante inferior 16 antes descrita. Con referencia a la figura 5, el tapón terminal 48 incluye un collarín cilíndrico 80, que tiene un diámetro aproximadamente igual al diámetro exterior del tubo 45' y una sección terminal 82 que se extiende hacia dentro. La sección terminal 82 es maciza, tiene una superficie exterior



84 conformada a manera de tronco de cono y tiene una superficie interior plana 86 contra la cual descansa el opérculo térmico 82. Se forma una cámara anular estrechada 88 entre la superficie exterior 84 y la superficie interior del tubo 45'. El tapón terminal inferior 48 incluye también el collarín cilíndrico 90, que tiene una superficie inferior 92 que descansa contra los alvéolos 24 circundantes para soportar los elementos combustibles 14. Está hecha una ranura circunferencial 94 entre los collarines 80 y 90 para impedir pérdidas de calor desde el collarín 80 durante la soldadura. El collarín 80 puede comprender parte del material de soldadura. La operación de soldadura consistirá entonces en calentar tanto el collarín 80 como el extremo del tubo 45' a una temperatura superior a sus puntos de fusión, dando como resultado su unión por fusión y la formación de una costura soldada circular.

En la figura 3 se ilustra una vista a escala ampliada en corte del extremo inferior de un elemento combustible que no incorpora los opérculos térmicos 102 e ilustra la expansión del elemento combustible que puede ocurrir durante el funcionamiento del reactor si no se emplean los opérculos térmicos. La figura 4 es un diagrama de temperaturas que ilustra las del elemento combustible de la figura 3 en diversas posiciones longitudinales y radiales. En el siguiente análisis, se supondrá que las condiciones de funcionamiento del reactor son tales que el centro del gránulo de combustible 50 está a una temperatura T_1 de 1.650°C., que es una condición típica de funcionamiento.

Con referencia a la figura 3, la temperatura T_2 en el centro del extremo del elemento combustible 50 se ha visto que es

336064



- de unos 1.065°C. cuando opera en el reactor y cuando T_1 es de 1.650°C. Como luego resultará evidente, la temperatura T_2 es mucho menor que la temperatura equivalente T'_2 (1.232°C.) del elemento combustible de la figura 5 del presente invento.
- 420.- Por las figuras 3 y 4 puede verse que la caída de temperatura (T_2 a T_7) a través del intersticio formado entre el gránulo 50 y el tapón terminal 48 es de unos 389°C. La temperatura central T_8 del tapón terminal es de unos 510°C. y las temperaturas radiales T_9 y T_{10} son de unos 400°C. y unos 300°C.,
- 425.- respectivamente. Con este grupo de condiciones de temperatura, la temperatura volumétrica media del tapón terminal 48 en la región de la soldadura es de unos 410°C. Debe señalarse particularmente, sin embargo, que la temperatura volumétrica media T_{11} del extremo del tubo 45' es de unos 300°C. lo cual está
- 430.- unos 11°C. por encima de la temperatura del agua que entra en el conjunto combustible y en relación de intercambio de calor con los elementos combustibles. Por esto puede verse que la diferencia en la temperatura volumétrica entre el extremo del tubo 45' y el tapón terminal 48 es de unos 100°C. Esta dife-
- 435.- rencia en las temperaturas medias volumétricas hace que el tapón extremo se expanda en mayor medida que el tubo, dando como resultado la deformación mostrada en la figura 3, que se ha exagerado con fines de ilustración. De la experiencia obtenida en ensayos y en funcionamiento real se ha visto que esta deformación ha debilitado la soldadura, dando como resultado una degradación prematura de la misma. Por ello se determinó que era necesario, o bien disminuir la temperatura media volumétrica del tapón terminal o bien aumentar la temperatura volumétrica media de la funda, o ambas cosas. La diferencia
- 445.- aceptable máxima en las temperaturas volumétricas medias es,

336064



como se ha visto, de unos 55°C.

Existen problemas prácticos que impiden muchas soluciones a este problema, ya que es muy importante que la altura de la columna de combustible se mantenga mínima y que se use un enfoque completamente seguro. Se han considerado muchos enfoques distintos para la solución de este problema. Al principio, se consideró necesario usar una barrera térmica cerámica, ya que la cerámica tiene la baja conductividad térmica necesaria para dar tanto una transferencia mínima de calor, como una altura mínima de la columna de combustible. Sin embargo, la cerámica posee la característica indeseable de agrietarse por esfuerzos mecánicos. Otro enfoque consistió en insertar una pequeña esfera entre el gránulo inferior de combustible y el tapón terminal. Aún cuando este enfoque era seguro, consumía una cantidad excesiva de altura axial y, por tanto, resultó de utilidad secundaria. Otro enfoque consistió en el uso de discos circulares que, sin embargo, como se vió, son deficientes desde el punto de vista de la fabricación ya que, con frecuencia, vienen a apoyarse con sus bordes en el fondo del elemento combustible. Se consideraron otras diferentes barreras térmicas, tales como conos, cilindros, opérculos cóncavos con un hueco, discos con un agujero en el centro y similares. Aunque resultaron útiles, estas realizaciones con constituyen la preferida del presente invento.

Con referencia ahora a las figuras 5 a 10, se ilustran los opérculos térmicos empleados en el elemento combustible del presente invento. Con fines de comparación entre un elemento combustible que no usa los opérculos térmicos (figura 3) con uno que los usa (figura 5), se supone que las tempe-



raturas T_1 y T_1' del combustible de estas dos figuras son
ambas de 1.650°C. Como se vé en las figuras 5, 7 y 8, los
opérculos térmicos 102 y 102', que tienen las formas trian-
gulares ilustradas, están dispuestos entre el gránulo de com-
480.- bustible 50 y el tapón terminal 48. Con preferencia, estos
opérculos térmicos están hechos de acero inoxidable 304 o de
circonio, teniendo los dos la elevada resistencia necesaria
y las características físicas y químicas convenientes. Sin
embargo, estos metales tienen también elevada conductividad
485.- térmica que, de ordinario, impediría su uso como barrera tér-
mica efectiva, especialmente cuando es crítica la altura axial
de la columna.

Sin embargo, en el uso experimental se ha visto que se
obtenía suficiente caída de temperatura a través de estos
490.- opérculos térmicos metálicos para proporcionar una barrera
térmica eficaz. Una pequeña parte solamente de esta caída de
temperatura era debida a los propios opérculos térmicos metá-
licos, ya que el metal tiene una alta conductividad del ca-
lor. Se cree que una gran parte de esta caída de temperatura
495.- es debida a las regiones interfaciales térmicas o intersti-
cios A, B y C que se forman respectivamente entre el gránulo
50 y el opérculo 102', entre el opérculo 102' y el opérculo
102 y entre el opérculo 102 y la superficie interior plana
86 del tapón terminal 48. Esta creencia se basa en la condi-
500.- ción de que estas regiones interfaciales térmicas estén lle-
nas de helio durante el funcionamiento inicial del elemento
combustible en el reactor y, luego, con helio y gases de es-
cisión en etapas posteriores del funcionamiento. Estos gases
tienen baja conductividad térmica con relación a la de los
505.- opérculos térmicos metálicos y, por tanto, las regiones in-



terfaciales térmicas actúan como barrera térmica extremadamente eficaz como resultará evidente en lo que sigue.

- 510.- Este efecto térmico se muestra en la figura 6 que es un diagrama de temperaturas que ilustra la temperatura en las posiciones longitudinales y radiales indicadas dentro del elemento combustible de la figura 5. La temperatura T'_1 es de 1.650°C. La temperatura T'_2 en el centro del extremo del elemento combustible 50 es de 1.232°C., unos 165° mayor que la temperatura T_2 del elemento combustible de la figura 3. El
- 515.- aumento en la temperatura T'_2 es resultado directo de las barreras térmicas, creadas por los opérculos 102 y 102', que vuelven a dirigir una parte del flujo térmico axial a través del tapón extremo 48 radialmente hacia fuera a través del gránulo y del tubo 45' del elemento combustible adyacente.
- 520.- Como se muestra en la figura 6, se obtienen grandes caídas de temperatura a través de las caras de contacto térmicas antes mencionadas como se indica por las diferencias de temperatura $T'_2 - T'_3 = 195^\circ$ (cara de contacto A), $T'_4 - T'_5 = 195^\circ$ (cara de contacto B) y $T'_6 - T'_7 = 195^\circ$ (cara de contacto C).
- 525.- Puede verse también que la caída de temperatura a través de cada uno de los opérculos térmicos 102 y 102' es sólo de unos 55°C., que es insuficiente para impedir la expansión del tubo. Las temperaturas central y radial del tapón terminal 48 son $T'_8 = 371^\circ$, $T'_9 = 335^\circ$ y $T'_{10} = 299^\circ$, que dan por resultado
- 530.- una temperatura volumétrica media del tapón terminal junto a la región de la soldadura de unos 343°, como se indica en la figura 6. Esto proporciona una temperatura volumétrica media diferencial entre el tubo y el tapón terminal de unos 44°, que es suficientemente pequeña para impedir una expansión diferencial excesiva y, con ello, deterioros de la soldadura.
- 535.-



Como se muestra mejor en las figuras 8 y 9, la forma preferida del opérculo térmico del presente invento es la de un triángulo equilátero que tiene cada uno de los vértices redondeado. Ha de entenderse que pueden emplearse diversas

540.- formas de triángulo con tal de que la forma elegida sea compatible con la función considerada. Además, el opérculo térmico se hace delgado de manera que puedan apilarse varios para dar una barrera térmica mayor, debido a las caras de contacto térmicas, que la que darían menos opérculos térmicos

545.- gruesos con la misma altura total. Aunque las dimensiones de los opérculos térmicos de este invento variarán, dependiendo de su uso, las dimensiones típicas de los opérculos térmicos en relación con el tubo de combustible mostrado en las figuras 5, 7, 8 y 9 son como sigue:

550.-	Tubo de combustible (diámetro interior)	12,65 mm.
	Holgura (D)	0,25 mm.
	Radio (R)	1,60 mm.
	Espesor (T)	1,60 mm.
	Anchura (W)	12,15 mm.

555.- Puede verse de esto que se crea una barrera térmica eficaz mediante los opérculos térmicos de gran conductividad del calor. Como antes se ha indicado, es particularmente importante que la altura de la columna de combustible se mantenga mínima y esto es posible con los opérculos térmicos del presente

560.- invento ya que la altura de una pluralidad de opérculos metálicos delgados apilados, con caras de contacto térmicas entre ellos, es considerablemente menor que la altura de un sólo miembro metálico que proporcione la misma resistencia térmica.

565.- Debe señalarse también que si el gránulo de combustible



se desmenuzará y llenará, el espacio anular formado entre la periferia de los opérculos y el tubo de elemento combustible, ello no crearía una mayor temperatura volumétrica diferencial ya que la temperatura periférica T'_{12} , es más fría que la temperatura central T'_2 .

570.-

Como se muestra en el elemento combustible segmentado de la figura 2, puede usarse un sólo opérculo metálico 103 para impedir una expansión diferencial excesiva entre el conector 44 y el tubo adyacente. El opérculo 103 sirve también para impedir que las partículas de los gránulos caigan a través de la abertura 72 y llenen así la cámara 104 del segmento inferior siguiente.

575.-

Como se ha indicado antes, se han considerado diversas barreras térmicas de distintas formas y también han sido probadas, pero la forma preferida es el opérculo triangular ilustrado en las figuras 8 y 9. Ha de entenderse que este opérculo no sólo da las funciones térmicas arriba descritas, sino que también su forma es particularmente adecuada para operaciones de fabricación. Con referencia a las figuras 10A, 10B, 10C y 10D, se ilustra la inserción de estos opérculos térmicos en un elemento combustible (con una longitud típica de 3,6 metros) durante una operación típica de fabricación. Los opérculos térmicos 102 y 102' ilustran respectivamente las dos condiciones posibles que pueden ocupar dos opérculos cuando van bajando por el tubo del elemento combustible. Como se ilustra en la figura 10A, el opérculo 102 está bajando por un elemento combustible inclinado, con la región del vértice 106 resbalando sobre el lado inferior del tubo del elemento combustible y detrás de las regiones de vértice 107 y 108 que están resbalando por los lados opuestos del tubo del elemento.

580.-

585.-

590.-

595.-



600.- miento combustible. Estos opérculos ocupan la posición mientras se deslizan por el tubo cuando se insertan inicialmente en el tubo del elemento combustible dos regiones de vértice cualesquiera. El opérculo térmico 102' se ilustra con la región de vértice 106' resbalando por el fondo del elemento combustible pero por delante de las regiones de vértice 107' y 108' que están deslizando por los lados opuestos del elemento combustible. Los opérculos ocupan esta posición mientras se deslizan por el tubo cuando se inserta inicialmente en el tubo cualquier región de vértice individual.

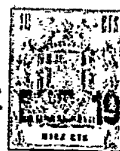
605.- Con referencia a la figura 10, la cara 110 del opérculo 102 chocará inicialmente contra la cara del tapón terminal 48. Cuando ocurre esto, el lado 110 se deslizará a través de la cara del tapón terminal y el vértice 106 continuará resbalando hacia abajo a lo largo del lado del tubo. Esta acción de deslizamiento simultáneo del lado 110 y el vértice 106, como se indica por las flechas de la figura 10B, continuará hasta que el opérculo esté de plano contra la cara del tapón terminal, como se indica en la figura 10C. El opérculo 110' que tiene el vértice 106' por delante del lado 110', tiene una acción diferente de la del opérculo 102 cuando choca contra el tapón terminal o contra un opérculo que esté descansando contra el tapón terminal. En esta situación, el vértice 106', chocará inicialmente contra la cara del tapón terminal o del opérculo 102 y luego girará en torno del vértice 106' como se ha ilustrado por la flecha de la figura 10C. Esta rotación continuará hasta que el opérculo esté de plano contra la cara del tapón terminal o del opérculo 102, como se ilustra en la figura 10D.

625.- Se ha encontrado que los opérculos circulares se desli-



- zan por el elemento de combustible de tal modo que sus caras quedan paralelas al eje longitudinal del elemento de combustible y, con frecuencia, vienen a descansar sobre sus bordes en el fondo del elemento combustible. Por consiguiente, cuando el gránulo de combustible 50 es insertado en el elemento combustible, chocará contra la parte alta del borde del disco circular. Esto puede dar como resultado, bien un espaciamiento excesivo del gránulo con respecto al tapón terminal, bien la rotura del gránulo. Lo primero, da como resultado una altura excesiva de la columna de combustible que afecta a la física del reactor. Lo último da como resultado la rotura del gránulo, lo que puede causar un espaciamiento excesivo de los gránulos o el contacto directo del gránulo con el tapón terminal.
- 630.-
- 635.-
- 640.- Como se ha descrito antes, se vence este problema usando los opérculos triangulares del presente invento.
- En ciertos casos puede ser deseable fijar inicialmente los opérculos térmicos a la cara del tapón terminal inferior y soldar luego el tapón terminal a la funda. Esta fijación puede llevarse a cabo remachando (a través de una abertura central prevista en cada uno de los opérculos 102 y 102') los opérculos al tapón terminal o mediante el uso de otras técnicas de conexión.
- 645.-
- La relación de anchura (W) a grueso (T) (W/T), véase la figura 9, del opérculo térmico, de aproximadamente 13, ha resultado adecuada para su uso en elementos combustibles que tienen las dimensiones antes descritas. Sin embargo, ha de entenderse que esta relación y otras dimensiones y formas pueden ser variada para acomodarse a necesidades particulares.
- 650.-
- 655.- Tales desviaciones dependerán de muchos factores, tales como

336064



los costes de fabricación de muchos opérculos térmicos con una relación grande W/T, la facilidad de la carga de los opérculos térmicos, el grado requerido de resistencia térmica, el metal particular de los opérculos, la forma particular de los opérculos, el diámetro interior del elemento combustible, el aumento tolerable máximo en la altura de la columna de combustible, y de otras consideraciones que resultarán evidentes para los expertos.

N O T A.-
=====

665.- Los puntos de invención propia y nueva que se presentan para que sean objeto de esta Patente de Invención en España, por veinte años, son los siguientes:

1.ª.- Mejoras introducidas en los elementos combustibles para reactores nucleares que incluyen un tubo alargado, combustible nuclear dispuesto en parte de dicho tubo alargado, un primer tapón terminal conectado a un extremo de dicho tubo alargado, un segundo tapón terminal conectado al otro extremo de dicho tubo alargado, medios dispuestos en dicho tubo alargado entre dicho combustible nuclear y dicho segundo tapón terminal para reducir la cantidad de calor transferida desde dicho combustible nuclear a dicho segundo tapón terminal para proporcionar una primera zona interfacial térmica entre dichos medios y dicho combustible nuclear y una segunda zona interfacial térmica entre dichos medios y dicho segundo tapón terminal, reduciendo dichas zonas interfaciales térmicas 1ª y 2ª la cantidad de calor transferida desde dicho combustible nuclear a dicho segundo tapón terminal con lo cual la diferencia de expansión volumétrica de dicho segundo tapón terminal y dicho otro extremo de dicho tubo jun-



- 685.- to a dicho segundo tapón terminal es suficientemente pequeña, durante el funcionamiento de dicho elemento combustible en dicho reactor nuclear, como para impedir que se establezcan esfuerzos excesivos en la conexión entre dicho segundo tapón terminal y dicho otro extremo de dicho tubo alargado.
- 690.- 2º.- Las mejoras del punto 1º, caracterizadas porque dichos medios comprenden por lo menos un delgado opérculo metálico con configuración triangular.
- 3º.- Las mejoras del punto 1º, caracterizadas porque dichos medios comprenden una pluralidad de delgados opérculos metálicos planos cada uno de los cuales tiene una configuración triangular y una zona interfacial térmica formada entre las superficies planas de opérculos adyacentes con lo cual dicha zona interfacial térmica ultimamente mencionada reduce la cantidad de calor transferida desde dicho combustible nuclear a dicho segundo tapón terminal.
- 695.- 4º.- Las mejoras del punto 1º, caracterizadas porque dichos medios comprenden un opérculo hecho de acero inoxidable del tipo 304 y que tiene dos superficies planas y sustancialmente paralelas separadas en una distancia de unos 0,75 mm., teniendo cada una de dichas superficies planas una forma aproximada de triángulo equilátero, teniendo cada uno de los vértices de dicho triángulo una forma redondeada con un radio de curvatura de unos 1,5 mm.
- 700.- 5º.- Las mejoras del punto 1º, caracterizadas porque dicho elemento combustible tiene una pluralidad de segmentos, cada uno de los cuales contiene combustible nuclear, un conector metálico que interconecta segmentos adyacentes de dicho elemento combustible, medios dispuestos entre dicho combustible nuclear y dicho conector de cada uno de dichos segmentos para reducir la cantidad de calor transferida desde
- 705.-
- 710.-
- 715.-



336064

25

dicho combustible nuclear a cada uno de dichos segmentos, una primera zona interfacial térmica entre cada uno de dichos medios últimamente mencionados y dicho combustible nuclear de cada uno de dichos segmentos, y una segunda zona interfacial térmica entre cada uno de dichos medios últimamente mencionados y un conector adyacente, reduciendo dichas zonas interfaciales térmicas primera y segunda que se acaban de mencionar la cantidad de calor transferida desde el combustible nuclear dispuesto en cada segmento al conector conectado a tal segmento.

720.-

725.-

6º.- "MEJORAS INTRODUCIDAS EN LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES PARA REACTORES NUCLEARES", todo tal y conforme se describe en la presente memoria, la cual consta de 729 líneas y a título de ejemplo se representa en los adjuntos dibujos.

Madrid, 25 ENE. 1967

JULIO DE PABLO
E.P.

Fdo: Vicente Morillas

336.064
336064 251

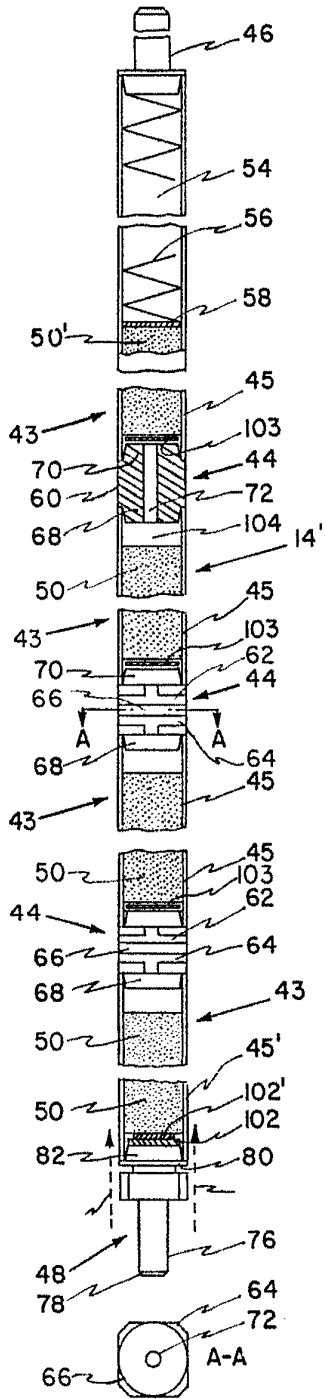


Fig 2

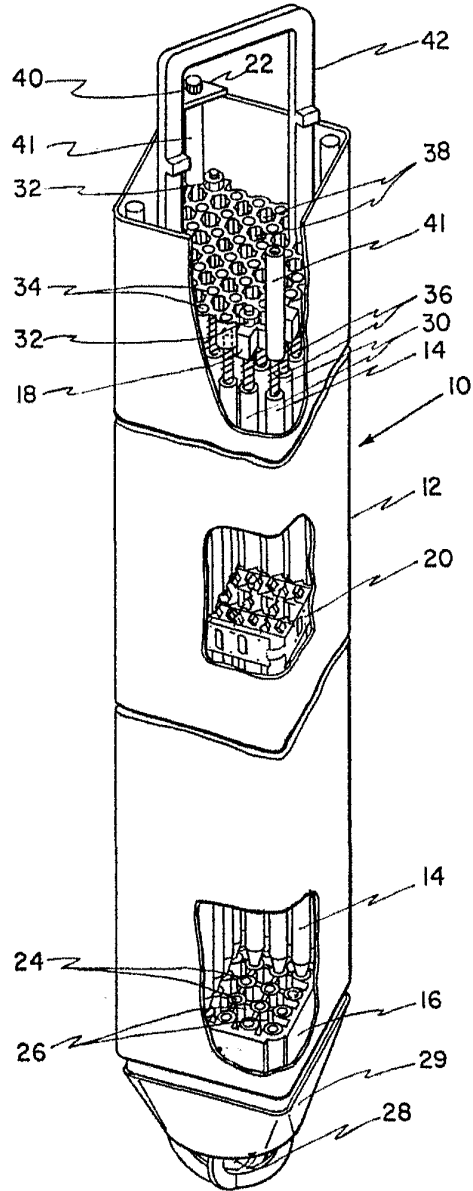


Fig 1

MADRID, 25 ENO. 1967
P.A.

336.061

25

7

336064

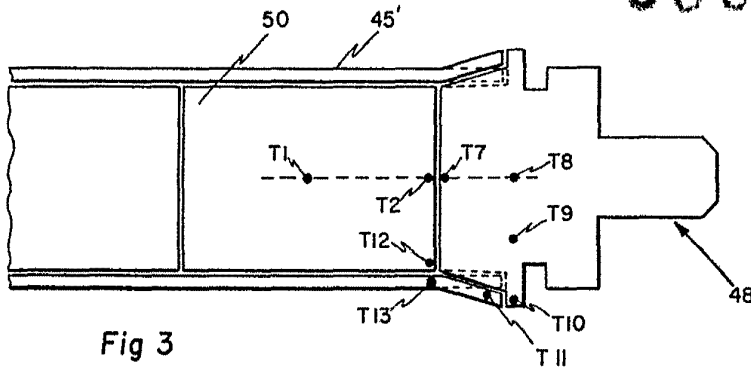


Fig 3

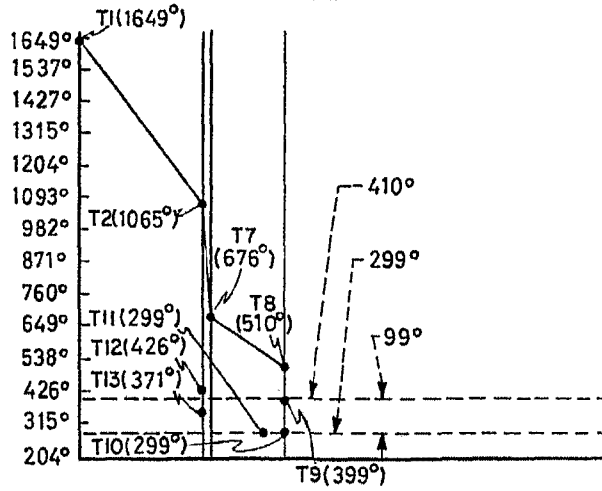


Fig 4

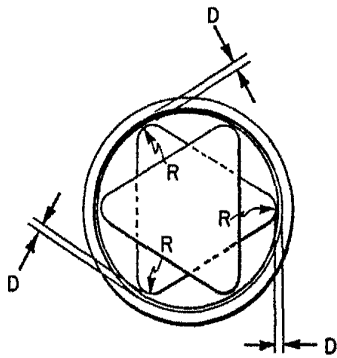


Fig 7

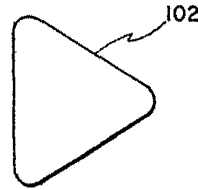


Fig 8

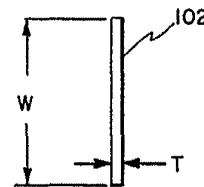


Fig 9

MADRID 25 ENE. 1967

ESCALA VARIABLE

336064

25

336064

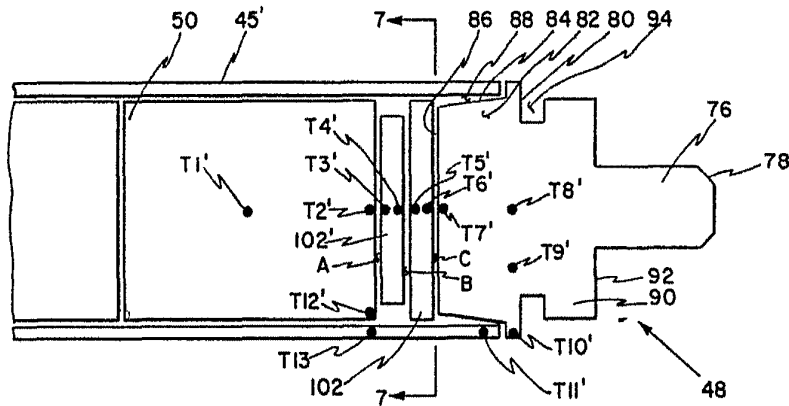


Fig 5

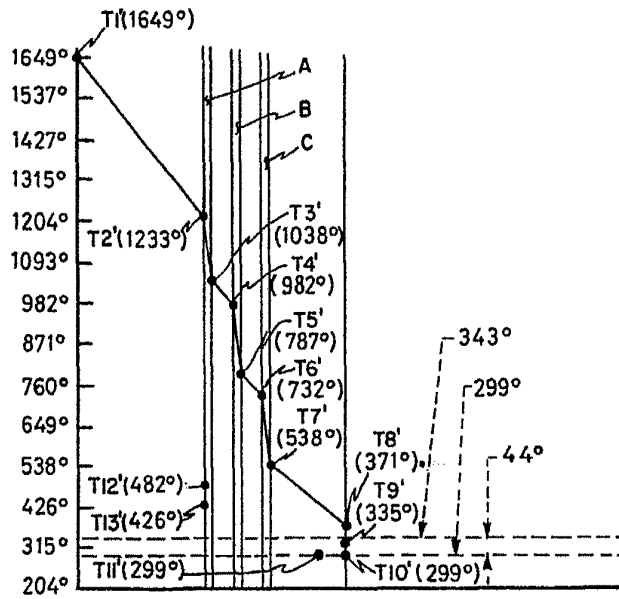


Fig 6

MADRID, 25 FEB 1967
P.A.

Handwritten signature

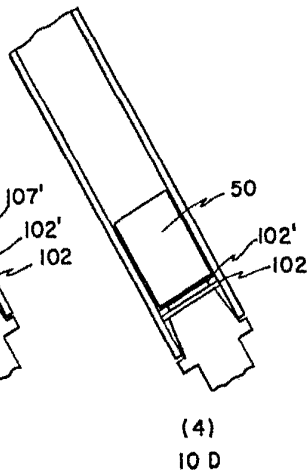
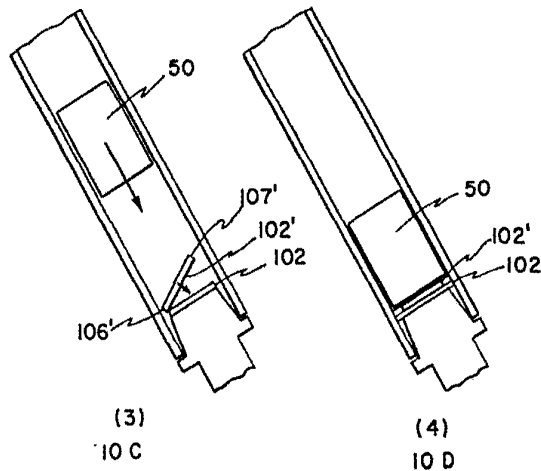
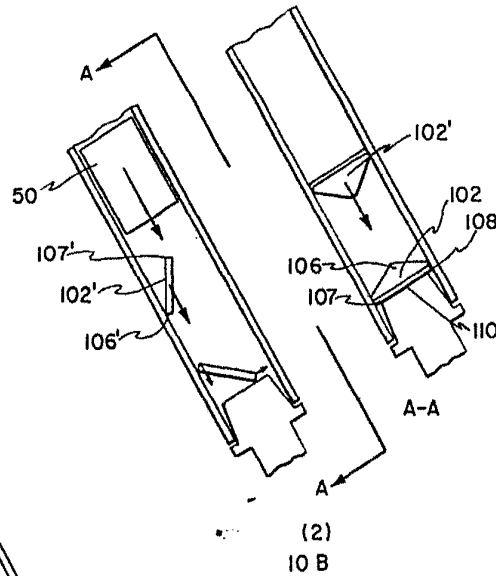
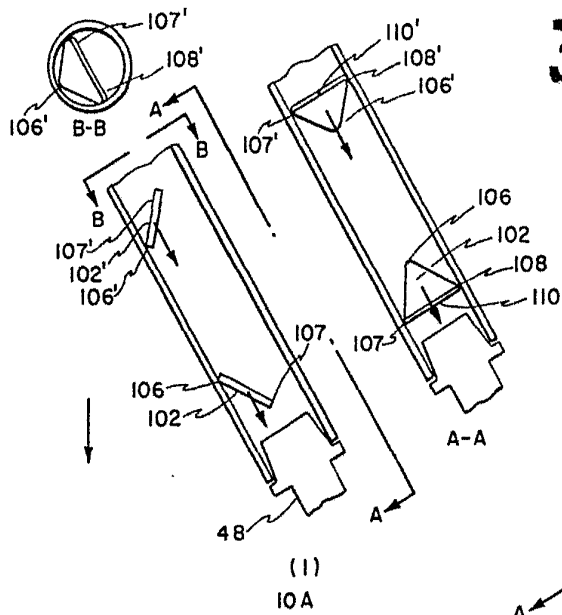
ESCALA VARIABLE

336.064

2!

67

336064



MADRID 25 ENE. 1967
P.A.

6113

ESCALA VARIABLE