

MINISTERIO DE INDUSTRIA  
REGISTRO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL



10	ES	11 21	NUMERO 422.792	10	A 1
		22	FECHA DE PRESENTACION 30-1-1974		

PATENTE DE INVENCION

30	PRIORIDADES:	32	FECHA	33	PAIS
	31	NUMERO			
		73-01524-0	2-2-73		Suecia

47	FECHA DE PUBLICIDAD	51	CLASIFICACION INTERNACIONAL G21C	62	PATENTE DE LA QUE ES DIVISIONARIA
----	---------------------	----	-------------------------------------	----	-----------------------------------

64	TITULO DE LA INVENCION
"PERFECCIONAMIENTOS INTRODUCIDOS EN UN ELEMENTO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR PARA USO EN REACTORES NUCLEARES PRODUCTORES DE ENERGIA"	

71	SOLICITANTE (S)
AKTIEBOLAGET ATOMENERGI	(AEP 869 Spa/ih)

DOMICILIO DEL SOLICITANTE
Liljeholmsvägen 32, Estocolmo, Suecia

72	INVENTOR (ES)
Johan Hilding MOGARD	

73	TITULAR (ES)

74	REPRESENTANTE
DON ALBERTO DE ELZABURU MARQUEZ	(P-56.552)

La presente invención se refiere en general a los elementos de combustible tipo granular cerámicos usuales que se usan ahora comúnmente en los reactores nucleares productores de energía. Característicamente cada elemento de combustible (varilla de combustible) comprende una pluralidad de cortos gránulos cilíndricos de material combustible cerámico sinterizado, en general óxidos de los metales fisiónables. Estos gránulos de combustible son apilados unos sobre otros, formando una larga columna continua. Esta columna de gránulos está encapsulada dentro de un tubo de revestimiento de gran ajuste, de un metal o aleación metálica adecuado. Ambos extremos del tubo de revestimiento se sueldan herméticamente con tapones de extremo. Usualmente también se encierra un gas de relleno, generalmente helio, dentro del elemento de combustible, para fines de transmisión de calor.

En particular, la invención se refiere a los elementos de combustible de reactores de energía de agua ligera (RAL). Las dos variantes, reactor de agua hirviendo (RAH) y reactor de agua a presión (RAP) dominan como sistemas productores de energía en los actuales reactores nucleares comerciales.

Aunque la experiencia de funcionamiento

de, por ejemplo, el elemento de combustible para RAL ha sido aceptable en general, hay aún varios problemas importantes asociados con su uso sin riesgo y de confianza, en particular bajo ciertos modos de funcionamiento y bajo algunas condiciones accidentales postuladas.

La magnitud y características de los defectos que se desarrollan ocasionalmente tienen a veces una naturaleza tan severa que el funcionamiento continuado se hace difícil o imposible, en particular a altos regímenes de calor del combustible, altos niveles de quemado de combustible y gran aumento de los regímenes de calor del combustible. Por estas razones se ha disminuído el máximo régimen de calor especificado en los reactores en funcionamiento, y se han introducido recientemente algunas restricciones en los modos de funcionamiento energético. Las recientes demandas aumentadas de seguridad han exigido también menores regímenes de calor del combustible, pero también la mejor transmisión posible de calor entre gránulo y revestimiento, para hacer mínima la cantidad de energía almacenada en el elemento de combustible.

Para que tengan alguna significación práctica, cualesquiera perfeccionamientos respecto a la confianza de funcionamiento del elemento de combusti-

ble ha de cumplir simultáneamente, por tanto, con las demandas de seguridad impuestas. La presente invención se basa en ese entendimiento.

5 La invención considera los defectos más severos de los elementos de combustible que tienen lugar durante el funcionamiento normal, y propone medios, en forma de un diseño modificado del elemento de combustible, para reducir eficazmente el desarrollo de tales defectos. Simultáneamente, el diseño modificado de combustible está conforme con los requisitos aumentados de seguridad. También proporciona 10 medios para mejorar ciertas características de seguridad del elemento de combustible.

15 En primer lugar, la invención considera el tipo de defectos que se desarrollan como pequeñas grietas que se propagan por el revestimiento del combustible, causadas por una severa interacción mecánica entre gránulo de combustible y revestimiento. La invención toma también en consideración el tipo de 20 defecto que se manifiesta como separación axial local de la larga columna o pila encerrada de gránulos, en dos partes separadas, formando entre ellas una abertura de varios centímetros de magnitud. Además, la invención se refiere a otros fenómenos que afectan 25 al grado de confianza, como se describirá más adelan-

te.

5 Los defectos de grieta tienen como resultado un desprendimiento de productos de fisión radiactivos al sistema de agua de refrigeración, causando una contaminación indeseable de dicho sistema, y posiblemente fugas radiactivas al ambiente. La presencia de los defectos de separación puede implicar el hecho de que ya no se puedan cumplir criterios establecidos de seguridad para el funcionamiento del reactor. Los inconvenientes y las implicaciones de seguridad de tales defectos pueden ser extensos, por tanto, y las medidas correctivas caras por lo que respecta a los propietarios de los reactores, así como a los fabricantes de combustible.

10 El fundamento fenomenológico de la creación de estos tipos de defectos está bastante bien conocido y descrito en la bibliografía. Por tanto, los mecanismos relevantes del daño solo se presentan a continuación en la medida en que ello sea necesario para la presentación y el entendimiento de la invención.

15 La interacción mecánica entre gránulos y revestimiento se origina en el funcionamiento por encima de un cierto nivel de potencia del elemento de combustible, y puede tener como resultado elevadas

tensiones y deformación plástica en el tubo de revestimiento. Estas tensiones se harán particularmente severas cuando el régimen de calor del elemento se aumente de repente considerablemente por encima de un nivel de energía anteriormente constante. Las grietas del revestimiento parten de la superficie interior del tubo, y se inician en las áreas de la misma que están sujetas a las más altas tensiones y mayores deformaciones cuando los gránulos se expanden térmicamente durante el aumento de potencia. Son áreas particularmente expuestas los engrosamientos (rebordes circunferenciales) formados en el tubo de revestimiento en las posiciones de las interfases gránulo-gránulo, entre otras cosas en vista de la forma tipo reloj de arena que los gránulos tienden a tomar.

El mecanismo de la formación de grietas requiere gran frotamiento entre gránulo y revestimiento, de manera que se haga más difícil el deslizamiento en la zona de contacto. Ello tiene como resultado grandes tensiones locales, particularmente en las extremadamente delimitadas áreas del interior del tubo de revestimiento que están cerca de y opuestas a una grieta en ensanchamiento en el gránulo en fuerte contacto. La capacidad del material de revestimiento para soportar tal deformación extremadamente localizada

es limitada, y además está muy reducida, particularmente en lo que respecta al Zircalloy, por la fragilización del material como resultado de la irradiación del reactor. Además, la presencia de productos de fisión químicamente activos, como yodo, y de contaminantes como fluor, puede facilitar la iniciación de las grietas en el revestimiento por la llamada corrosión bajo tensiones.

5

10

La pauta de tensiones en la formación de tales fracturas del revestimiento es a menudo del tipo biaxial, siendo predominante la componente de la tensión orientada circunferencialmente. Por tanto, las grietas se propagan en general en la dirección longitudinal del tubo de revestimiento.

15

20

25

Este tipo de interacción mecánica se hace particularmente pronunciado a niveles de quemado relativamente altos, por ejemplo aproximadamente 10.000 MWD/tU (megawatios día por tonelada de uranio) y más. Para hacer mínima la velocidad de formación del defecto se toman, por tanto, ciertas precauciones en el funcionamiento del combustible. La magnitud y velocidad de aumento de la potencia se restringen a un mínimo, y en general se evitan las variaciones de potencia. Desde luego, tales restricciones son indeseables desde el punto de vista del funcionamiento.

En lo que respecta al antes mencionado defecto del tipo de separación en la columna de gránulos, este defecto puede ser resultado de una densificación o sinterización continuada de los gránulos que tenga lugar en el reactor. El efecto perjudicial de la separación de los gránulos estriba principalmente en el que hecho de que da como resultado un pico local de potencia en la abertura del gránulo, que puede afectar al margen establecido de seguridad en la potencia. Bajo la influencia de la alta presión del refrigerante, el tubo de revestimiento puede ser también comprimido hacia el interior de, o aplastado en, la abertura axial de la columna de gránulos. Ello da como resultado un nuevo aumento local no intencionado de la potencia. Como resultado de la deformación local el material de revestimiento puede fracturarse en el área, debido al aplastamiento.

Los defectos de separación de esta clase pueden ser también resultado de fenómenos distintos de la densificación, tales como "trinqueteo" y "crecimiento", los cuales fenómenos se presentan primordialmente, ambos, como continuado aumento de la longitud del revestimiento por funcionamiento extendido del reactor, y pueden tomar proporciones inaceptables. Bajo el continuado aumento de longitud puede

ser arrastrada conjuntamente una parte de la columna de gránulos encerrada, formando una abertura local axial en la misma.

5 Común al mecanismo que está tras los fenómenos resultantes en defectos de separación, se halla la existencia de un pequeño pero repetido movimiento o caída de los gránulos dentro del tubo de revestimiento, dentro de la parte de la columna de gránulos que se halla por debajo de la abertura, de manera que esta parte se empaqueta progresivamente y se  
10 agranda la abertura.

Los defectos de separación debidos a la densificación se originan ya a niveles de quemado moderados, e influyen en el estado de riesgo de manera  
15 desventajosa. Por tanto, no son aceptables si los márgenes de seguridad aplicables ya han sido utilizados totalmente al nivel de potencia de funcionamiento especificado.

Las mejoras proporcionadas por la invención influyen en dicho mecanismo de daño respecto a  
20 la interacción mecánica, así como a la separación de gránulos, en tal medida que son eliminados o se evita casi totalmente que se originen.

La invención contrarresta también otros  
25 procedimientos potencialmente dañosos dentro del ele-

mento de combustible durante el funcionamiento. Estos se presentan en relación con la descripción de la invención que sigue.

5 Un objeto principal de la invención es, por tanto, mejorar el grado de confianza de funcionamiento normal del elemento de combustible, esencialmente en lo que respecta a los efectos destructores de la interacción mecánica combustible-revestimiento durante ciertos modos de funcionamiento en potencia.

10 Otro objeto principal es mejorar el comportamiento relacionado con el riesgo de los elementos de combustible durante condiciones accidentales postuladas, es decir, durante un accidente de pérdida de refrigerante (APR).

15 Aún otro objeto principal es efectuar estas mejoras adoptando los criterios establecidos de diseño y comportamiento de los elementos de combustible usuales, y aplicando las técnicas de fabricación establecidas para los elementos y sus componentes.  
20 Así, la invención pretende ser totalmente conforme a los recursos de producción de combustible y saber hacer ingenieril actualmente disponibles.

25 La invención estriba en la mejora de que el tubo de revestimiento del elemento de combustible, sobre su superficie interior cilíndrica, está provisto

de una pluralidad de elementos de separación que sobresalen ligeramente, de forma y en distribución adecuadas. Dichos elementos tienen como objeto principal evitar la creación de un extenso contacto mecánico entre dicha superficie interior y las superficies cilíndricas de los gránulos de combustible. Además, dichos elementos tienen como objeto distribuir las fuerzas de contacto entre el gránulo y el tubo de revestimiento, de manera adecuada. También se deforman algo bajo la presión de contacto, particularmente en los bordes del gránulo.

La invención se describirá ahora con más exactitud mediante ejemplos de realizaciones no limitativas del elemento de combustible nuclear de la invención. Estas realizaciones se ilustran en los dibujos del anexo, en los que los mismos numerales de referencia se refieren a los mismos detalles de las diferentes figuras de los dibujos.

En los dibujos, la Fig. 1 muestra un elemento típico de combustible de RAL, en sección recta axial. (Sin embargo, la invención no está aparente en esta vista concreta). La Fig. 2 muestra en aumento una sección recta a través del elemento de combustible de la Fig. 1, hecha en conformidad con la invención, estando tomada la sección a través de un gránulo.

lo de combustible nuclear del mismo. Las Figs. 3-5 muestran detalles de diferentes realizaciones del tubo de revestimiento del elemento de combustible de la invención. Las Figs. 6 y 7 ilustran en vistas aumentadas las condiciones alrededor del área de transición entre dos gránulos de combustible nuclear, en relación con una realización del elemento de combustible de la invención. En esta exposición la expresión "sección recta", según se usa por ejemplo en relación con las Figs. 2-6, significa una sección a través del elemento o tubo, tomada en un plano perpendicular al eje central del elemento de combustible.

El elemento de combustible, según se muestra en la Fig. 1, es conforme en todos los detalles - salvo por los elementos de separación sobre la superficie interior del tubo de revestimiento - a un elemento de combustible de RAL tipo normal. Los gránulos 3 sinterizados de la columna encapsulada están, por tanto, rectificadas sin puntos a dimensiones de diámetro muy precisas, en general dentro de un intervalo de tolerancia de  $\pm 0,010$  mm, siendo el diámetro del gránulo del orden de 8-12 mm, dependiendo del diseño real. Las alturas de los gránulos pueden variar entre 8-20 mm, y las superficies de los extremos de los gránulos se hacen a menudo cóncavas, "en

plato", para hacer mínima la expansión térmica axial de la columna de gránulos durante el acercamiento a la potencia. La altura total de la columna de gránulos es bastante considerable, usualmente del orden de aproximadamente 4 metros. El tubo 1 de revestimiento se hace de una aleación de circonio, generalmente Zircalloy, igual que los dos tapones 4 y 8 de los extremos. Los tapones de los extremos están provistos de espigas 6 y 10, respectivamente, salientes axialmente. Dichas espigas 6 y 10 tienen como objeto mantener al elemento de combustible en una posición fija en el reactor propiamente dicho, de manera usual. El tubo 1 se ajusta alrededor de la columna de gránulos con un cierto espacio de holgura anular (radial) de montaje en frío, por ejemplo comprendido entre aproximadamente 0,07 y 0,15 mm. Una holgura de tolerancia particular es típicamente  $\pm 0,05$  mm. (En esta exposición, respecto a las dimensiones de esta holgura anular entre revestimiento y gránulos, siempre se hace referencia al espacio nominal de montaje en frío entre la periferia interior nominal circular del tubo de revestimiento, sin considerar los elementos de separación, y la superficie cilíndrica exterior de los gránulos de combustible). Estas precisas dimensiones de pequeña holgura se requieren para hacer mínima la

caída de temperatura durante el funcionamiento, y evitar simultáneamente una interacción mecánica más severa, que representa una fuente potencia de problemas de funcionamiento en el elemento de combustible usual de RAL. Durante el funcionamiento la holgura de montaje en frío se cierra más o menos, dependiendo del régimen real de calor y de la magnitud de quemado. A menudo se forman rebordes circunferenciales sobre la superficie de revestimiento, en las posiciones de las interfases gránulo-gránulo, debido a interacciones mecánicas y distorsión -"formación de reloj de arena" - de los gránulos individuales. En el caso severo se desarrollan fracturas del revestimiento en esos rebordes, en los elementos de combustible usuales de la técnica anterior.

Para mejorar la transmisión de calor en la holgura anular se añade helio gaseoso al volumen hueco del elemento de combustible. En los elementos de combustible de RAP este helio gaseoso se pone previamente a presión en la actualidad, con el fin de evitar una fluencia prematura del tubo de revestimiento sobre la columna de gránulos durante el funcionamiento.

Haciendo referencia de nuevo a la Fig. 1, se dispone un espacio (14) a presión para acomodar los

gases de fisión desprendidos y el exceso de helio gaseoso. También está situado en ese espacio a presión un muelle 14 helicoidal que actúa sobre la columna de gránulos. Este muelle 14 helicoidal tiene como fin principal mantener a los gránulos de combustible en su sitio durante el transporte y la manipulación del elemento de combustible, pero se ha de observar que el muelle no puede evitar la separación axial de los gránulos durante el funcionamiento.

10 Las partes salientes o elementos de separación sobre la superficie interior del tubo de revestimiento, que ventajosamente se hacen formando parte integrante con dicho tubo, tienen adecuadamente forma de nervios 5 paralelos entre sí que se extienden axialmente, por ejemplo en conformidad con la realización de la Fig. 2. Se ha de entender, aunque no está claro en las figuras, que los elementos de separación en forma de tales nervios se extienden axial o longitudinalmente a lo largo del elemento de combustible, a lo largo de la totalidad de la longitud del tubo de revestimiento, al menos a lo largo de la parte del alma del tubo ocupada por la columna de gránulos. Dentro del ámbito de la invención se pueden concebir también otras formas de elementos de separación, por ejemplo una multitud de verrugas salientes



tos de distanciamiento se hace importante respecto a la transmisión de calor y distribución de las fuerzas de interacción. La forma se ha de adaptar también a la técnica de fabricación elegida, preferiblemente a la técnica de reducción de tubo de tipo normal mediante mandrinado oscilante en un mandril.

Se puede dar diferentes formas al perfil de la sección recta de un elemento individual de separación que se extienden longitudinalmente, como está claro por las Figs. 2-5. Así, la Fig. 2 muestra elementos 5 de separación que se extienden axialmente que tienen, en sección recta, una forma trapezoidal. La Fig. 3 muestra en más detalle una vista aumentada de dichos elementos de separación de la Fig. 2, demostrando que cada elemento 5 de separación está redondeado en su base y tiene una superficie de cúspide plana enfrentada hacia dentro.

La Fig. 4 muestra en vista aumentada un detalle de un tubo 1 de revestimiento que incorpora la invención. En esta realización los elementos 5 de separación que se extienden longitudinalmente tienen en sección recta una forma conforme a un segmento de círculo formado entre la periferia interior circular del tubo 1 de revestimiento y una cuerda C trazada sobre el círculo correspondiente al alma del tubo de re-

vestimiento. Esta realización es de particular interés, debido al hecho de que permite obtener pequeñas tolerancias respecto a la altura radial de los nervios 5, debido a su relación geométrica con la anchura circunferencial del nervio, que es significativamente más grande y por tanto se puede controlar con mayor precisión en la manufactura del tubo. Esto significa que la sección recta de los nervios 5 según se muestra en la Fig. 4 es particularmente útil dentro del intervalo menor de alturas radiales, es decir, por debajo de aproximadamente 0,02 mm.

La Fig. 5 muestra una realización en la que se han dado a los elementos 5a y 5b de separación diferentes perfiles de sección recta, en uno y en el mismo tubo de revestimiento. Así, cada tercer elemento 5a de separación de la realización según la Fig. 5 tiene un perfil relativamente estrecho y alto, para comunicar una pequeña resistencia a la deformación y con ello una máxima fijación axial del gránulo. Los elementos 5b de separación intermedios tienen un perfil relativamente ancho y bajo, para dar mejor resistencia a la deformación y perfeccionar la transmisión de calor desde el combustible nuclear al tubo de revestimiento.

Como se ve en sección recta, los elemen-

tos de separación pueden tener en sus bases, por ejemplo, una extensión correspondiente a aproximadamente la mitad del espesor de pared del revestimiento, pero también se pueden concebir otras dimensiones. La línea de contacto del perfil en sección recta con los gránulos de combustible adyacentes puede tomar diferentes anchuras, dependiendo de la forma del perfil y del grado de deformación del perfil de la sección recta en el funcionamiento.

El número de elementos de separación dispuestos sobre la superficie interior del tubo de revestimiento puede variar dentro de intervalos bastante anchos. Sin embargo, respecto a los nervios que se extienden axialmente, tal como según la realización que se muestra en las Figs. 2-6 de los dibujos, un límite inferior práctico es 3, dado que es el mínimo número de nervios que permitirá centrar los gránulos de combustible nuclear dentro del tubo de revestimiento. Desde luego, este número mínimo requiere una distribución circunferencial uniforme de los nervios sobre la superficie interior del tubo de revestimiento. Dependiendo de la técnica para manufacturar los nervios, su altura radial, su forma de la sección recta, etc, se pueden usar diferentes números de nervios. Un intervalo práctico para la mayo-

ría de los fines, considerando también la distribución de las fuerzas de interacción y la transmisión de calor, es 8 a 64 nervios, mientras que un intervalo preferido es 12 a 36, y un intervalo particularmente útil es 16 a 32.

5

Para hacer óptima la transmisión de calor entre combustible nuclear y revestimiento es deseable no solo trabajar con la holgura anular más pequeña posible, sino también obtener una cierta área de contacto entre los nervios y los gránulos de combustible. En relación con esto se ha hallado que la anchura circunferencial de la superficie de contacto entre cada nervio y gránulo debe ser como mínimo aproximadamente 0,1 mm. Sin embargo, se debe observar que este es el requisito mínimo deseado en lo que respecta a la superficie de contacto entre nervio y gránulo, y que en el funcionamiento esta cifra puede ser significativamente mayor.

10

15

Los elementos de separación diseñados y dispuestos en conformidad con la invención influyen en las condiciones de contacto mecánico en el funcionamiento entre gránulo y revestimiento, de una manera que evita daños en varios aspectos. Particularmente, los elementos (nervios) de separación que se extienden axialmente, orientados en paralelo, dan pro-

20

25

nunciadas ventajas y por tanto constituyen la realización preferida. En lo que sigue la invención se aclara con referencia a estos tipos de realizaciones.

5 La influencia de los elementos de separación sobre el comportamiento del combustible se considera primero en relación con el contacto inicial entre gránulo y tubo de revestimiento, cuando se eleva el régimen de calor del elemento de combustible. En comparación con un tubo de revestimiento son elementos de separación interiores, y usando el mismo tamaño de holgura anular, el contacto mecánico comenzará ahora a un nivel de potencia inferior. Cuanto mayor sea la altura de los elementos de separación menor será la potencia de contacto. La medida de altura en cuestión se ajusta adecuadamente de manera que a la potencia de funcionamiento normal se cree contacto mecánico con una cierta deformación plástica de los elementos de separación. En este contexto se debe señalar que en los elementos de combustible de RAL usuales solo se busca normalmente un mínimo de interacción mecánica entre gránulos y revestimiento.

10

15

20

En las Figs. 6 y 7 se ilustran respectivamente una sección recta y una sección longitudinal de los elementos de separación deformados de esta ma-

25

nera, esquemáticamente. Por la sección recta de la Fig. 6 está claro que el perfil del elemento 5 de separación experimenta una cierta deformación plástica delimitada, indentación, en vista del hecho de que la presión de contacto excede inicialmente de la resistencia a la compresión del material del elemento de separación. Con la indentación en aumento, la resistencia a la compresión está aumentando rápidamente, en vista de la forma del perfil, de manera que la indentación continuada está progresivamente estorbada. Por la sección longitudinal de la Fig. 7, que ilustra el tubo 1 de revestimiento en las interfases gránulo-gránulo, está claro cómo cada gránulo de combustible deforma al elemento 5 de separación que se extiende longitudinalmente, de manera que se crea en él una marcada discontinuidad 9 en el espacio 7 entre los gránulos 3. Ventajosamente, los gránulos se hacen con bordes 11 achaflanados según la Fig. 7, para permitir que se dé forma adecuada a esta parte o discontinuidad 9, que tiene como fin evitar el movimiento relativo axial entre gránulo y tubo de revestimiento. El dentado del perfil longitudinal del elemento 5 de separación refleja claramente la forma tipo reloj de arena de los gránulos 3. Así, los elementos de separación evitan el contacto directo entre el interior

del tubo de revestimiento y los bordes afilados de gránulo en sus superficies extremas.

5 La influencia de los elementos de separación sobre la situación, en dicho tipo de interacción mecánica que conduce al fallo del revestimiento cuando se abre una grieta en el cuerpo rígido del gránulo cerámico, por ejemplo durante un repentino aumento de potencia, será considerada a continuación.

10 En el funcionamiento, los gránulos 3 de combustible nuclear de los elementos de combustible experimentan un cierto agrietamiento, en vista de la caída de temperatura a través del gránulo. Una pauta típica de grieta puede presentar una pluralidad de grietas que se extienden radialmente, en una sección recta a través del gránulo 3 según la Fig. 2.  
15 En una sección longitudinal a través del mismo gránulo también se puede observar un cierto número de grietas transversales, aunque en menor número. En el funcionamiento, todas estas trayectorias de grieta  
20 permanecen algo ensanchadas hacia la periferia.

25 En un aumento de potencia, estas aberturas de grieta de gránulo existentes se ensanchan más, al mismo tiempo que se pueden formar nuevas grietas. Bajo tales circunstancias, y en ausencia de los elementos de separación, se puede originar ahora una

fractura en el tubo de revestimiento, en el área localmente bajo tensiones justamente opuestas a la grieta de gránulo que se abre a la zona de contacto. Sin embargo, la presencia de los elementos de separación afectará radicalmente al mecanismo de fallo atribuido a las grietas radiales, que son las más perjudiciales según la experiencia.

En primer lugar, se observará que la mayor parte de las grietas de gránulo se abren en el área entre los elementos 5 de separación muy distribuidos, donde existe un contacto nulo o insignificante entre gránulo y revestimiento. Véase la Fig. 2. Por tanto, el ensanchamiento de la grieta no puede resultar en picos de tensión local y deformación en el área opuesta del interior del revestimiento, sino que el movimiento será simplemente transmitido por las fuerzas de frotamiento en los elementos 5 de separación independientes, como estiramiento general de la totalidad de la sección del tubo entre ellos. Un cierto estiramiento absoluto de esta clase es absorbido mejor, desde luego, por el material del tubo, cuanto más larga sea la distancia de estiramiento en relación a la anchura de la abertura de la grieta, es decir, cuanto más separados estén los elementos 5 de separación.

En segundo lugar, las aberturas de grieta situadas entre los elementos de separación se activan para abrir mucho más fácilmente que las pocas grietas que resulta que están situadas en la zona de contacto con los elementos de separación. Concretamente, estos últimos - además de la resistencia de deformación del revestimiento - tienen que superar también la resistencia de frotamiento.

Considerando ahora la pauta de grietas transversales del cuerpo de combustible cerámico, se puede observar por experiencia que esas grietas, en ausencia de elementos de separación, no crean normalmente fracturas en el material de revestimiento al aumentar la potencia. La causa de ello es probablemente el hecho de que el ensanchamiento de la grieta de gránulo está contrarrestado por la "formación de reloj de arena" que tiene lugar simultáneamente.

Las fuerzas destructivas transferidas normalmente a áreas delimitadas del tubo de revestimiento, como resultado de tales movimientos relativos locales que acompañan a la interacción mecánica, estarán por tanto fuertemente contrarrestadas, y por tanto serán poco o nada dañosas cuando se usa la construcción de elemento de separación de la invención.

Esto significa también que se contrarres-

tan también otros fenómenos de naturaleza similar conectados a este tipo de interacción mecánica, tal como fatiga y corrosión bajo tensiones.

5 En lo que respecta a la otra clase de desarrollo de defectos a causa de repetido movimiento axial relativo entre gránulos y revestimiento en el funcionamiento, concretamente separación de gránulos y anormal aumento de longitud por trinquete, la función útil del mismo elemento de separación es  
10 de naturaleza sencilla. Ya en el primer aumento de potencia hasta un nivel de potencia tal que se alcance contacto mecánico entre gránulos y elementos de separación, el perfil de la sección recta de los elementos de separación se indenta en cierta medida, particularmente en las áreas de intersección de gránulo  
15 - como se ha indicado anteriormente. Al mismo tiempo, el volumen intermedio de los elementos de separación en las interfases gránulo-gránulo permanece relativamente sin tocar, o incluso algo empujado en sentido de la altura. Así, entre las superficies extremas de  
20 los gránulos se forman en los elementos de separación acusadas discontinuidades (véase 9 en la Fig. 7) o pequeñas plataformas salientes. Por tanto, cada gránulo independiente permanece fijado en posición axial, y  
25 se evita que se mueva axialmente en relación al tubo

de revestimiento.

5 El número de elementos de separación que se extienden longitudinalmente, requerido para proporcionar tal fijación axial, está muy delimitado, pero se debe extender a por lo menos tres, uniformemente distribuidos por la sección recta.

10 Así, los gránulos no pueden ayudar ahora a la creación de defectos de separación axial de la clase antes mencionada, por densificación o crecimiento. Además se evitará el trinqueteo. Con gránulos axialmente amarrados de esta manera, un aumento adicional de potencia tiene como resultado el estiramiento axial del tubo de revestimiento por cada gránulo individual entre dichas plataformas, y por tanto el estiramiento se distribuirá uniformemente a lo largo de la totalidad de la longitud del tubo de revestimiento. En ausencia de elementos de separación existe el riesgo de que el mismo estiramiento esté localizado en una sola porción del revestimiento, donde puede tener lugar una rotura.

20 Los elementos de separación interior de conformidad con la invención tienen también como resultado un cierto número de otras ventajas importantes desde el punto de vista del apropiado comportamiento del elemento de combustible. Así, entre otras

cosas, se evita la adhesión entre gránulo y revestimiento causada por la acción adhesiva de ciertos productos de fisión, que aumenta esencialmente el coeficiente de frotamiento. Además se evita que fragmentos discretos de gránulo experimenten desplazamiento radial y hacia fuera hasta entrar en contacto íntimo directo con el interior del tubo de revestimiento, por ejemplo como resultado de vibraciones o manipulación del elemento de combustible cuando el reactor está parado. La experiencia muestra que tales desplazamientos radiales de los fragmentos de gránulo pueden tener como resultado una expansión diametral adicional del tubo de revestimiento cuando se aumenta la potencia. En principio, el mismo efecto beneficioso de los elementos de separación se refiere al hinchamiento radial de los gránulos de combustible que puede tener lugar a altos niveles de quemado.

Las ventajas adicionales que se acaban de mencionar aparecen ya con elementos de separación que sobresalen muy ligeramente, es decir, a una medida de altura de al menos del orden de magnitud de 0,001 mm o 1 micra. La distribución de los elementos de separación debe ser relativamente uniforme en una sección recta dada, al mismo tiempo que el número debe ser relativamente grande, es decir, aproximadamente el

mismo que el que sea óptimo cuando se esté dimensionando contra el efecto del tipo antes mencionado de interacción mecánica.

5                    Otra ventaja de la invención está relacionada con las pequeñas secciones de holgura residual entre gránulo y tubo de revestimiento, y estriba en el hecho de que las sustancias químicamente agresivas, por ejemplo los gases de fisión y gases que contienen hidrógeno, que pueden reaccionar con el material de revestimiento e influir destructivamente sobre el mismo por corrosión bajo tensiones o formación de hidruros, serán diluidas en el espacio de holgura por el gas de relleno presente, tal como helio u otros gases inertes, disminuyendo así su actividad química.

10                    Las secciones de holgura radial que forman así canales longitudinales a lo largo de la totalidad de la longitud del elemento de combustible tienen como resultado una comunicación continua del gas de relleno con el llamado volumen a presión por encima de la pila de gránulos, dentro del tubo de revestimiento. Por convección térmica, etc, en las holguras de gas, esta comunicación significa que unas fracciones del gas de relleno fluyen continuamente, ascendiendo y descendiendo, por las holguras, al tiempo que se mezclan con el gas de relleno en el espacio

a presión. Así, el gas de relleno contaminado procedente de las holguras es diluido y reemplazado por gas de relleno limpio. De manera conocida por sí misma, el gas de relleno puede ser liberado de contaminantes, por ejemplo de hidrógeno gaseoso, mediante una sustancia "captadora" aplicada en el espacio a presión. De la misma manera, el gas de relleno puede ser puesto en contacto con otras sustancias suministradas al elemento de combustible, por ejemplo carbono activado, para afectar químicamente a la composición del gas de relleno.

Una ventaja de considerable importancia respecto al riesgo se refiere a esos canales longitudinales entre la columna de gránulos y el tubo de revestimiento, debido a la presencia de los elementos de distanciamiento. Bajo un APR postulado se inyecta agua de refrigeración en el núcleo del reactor, para enfriar eficazmente los elementos de combustible y evitar una fusión. La temperatura a que tiene lugar la destrucción o el hinchamiento (aglobamiento) de los elementos de combustible fija los requisitos del sistema de seguridad. La comunicación del gas encerrado a lo largo de la varilla de combustible, que es facilitada por los elementos de separación, reducirá eficazmente la tendencia a tal aglobamiento o

destrucción, ya que la comunicación con el gas enfria do del volumen a presión evitará que se acumule local mente una presión extensa a lo largo de los elementos de combustible.

5                   Otras ventajas se refieren al centrado radial y a la alineación del eje central de los grá nulos independientes, con la línea central del tubo de revestimiento, tal como lo proporcionan los elemen tos de separación, cuando se monta el elemento de com bustible. Esto da como resultado, entre otras cosas, una disminución de la incidencia de arañazos interio res y otros daños a la superficie interior del tubo de revestimiento, por ejemplo en la manufactura y en 10 el aumento de potencia. Con ello, la película de óxi do o un revestimiento superficial aplicado intencionada mente, que tienen como objeto proteger al material del tubo de revestimiento frente al ataque químico por gases de fisión o similares en el gas de relleno, 15 permanecerán intactos en el espacio entre los elemen tos de separación. 20

                  Esta característica del elemento de sepa ración, protegiendo al interior frente a daños mecá nicos causados por pequeñas deficiencias geométricas 25 de los gránulos, también admite que se acepten algunas variaciones mayores en el diámetro del gránulo, en la

naturaleza de las superficies de los gránulos y en la forma de los gránulos. Así, por ejemplo, se pueden usar gránulos sin pulir. Además, se pueden aceptar menores holguras nominales entre gránulos y revestimiento, en vista del hecho de que se pueden tolerar mayores estiramientos. Ello a su vez da como resultado, muy inesperadamente, una transmisión de calor mejorada en comparación con los elementos de combustible usuales, y por tanto una temperatura central disminuída de los gránulos de combustible. Ello es una ventaja desde el punto de vista de la seguridad.

Los elementos de separación delimitan también el aplastamiento oval del tubo de revestimiento, que tiene lugar particularmente a altas presiones de operación. El aplastamiento oval puede conducir por otra parte a una mayor deformación local en las formaciones de reborde circunferencial en las porciones de interfase de gránulo. Ello puede tener como resultado fenómenos de trinqueteo y tensiones de fatiga.

Considerando la interacción mecánica controlada entre gránulos de combustible y revestimiento, proporcionada por los elementos de distanciamiento, también se hace posible abandonar la puesta previa a presión requerida en los elementos de combusti-

ble de RAP.

5           La solución de diseño aquí descrita, aunque toma particularmente en consideración los problemas relacionados con los elementos de combustible enfriados con agua, es también aplicable en principio a otros tipos de elementos de combustible, por ejemplo elementos de combustible revestidos con acero inoxidable para reactores enfriados por gas o enfriados por sodio.

10           Los elementos de separación se hacen adecuadamente formando parte integrante con el tubo de revestimiento, y esto se puede disponer como parte de la manufactura ordinaria del tubo, por ejemplo en operaciones de laminación a paso de peregrino o  
15           estiramiento. En relación con ello, las herramientas de mandril pueden estar provistas de surcos que se extiendan longitudinalmente, correspondiendo con la sección recta del elemento de separación.

20           La experiencia obtenida hasta ahora en la manufactura de los tubos de revestimiento con el diseño según la invención confirma que el método usual de reducción de tubo es bien adecuado para este fin. Sin embargo, para permitir el uso de los equipos usuales de ultrasonidos en la búsqueda de defectos tales  
25           como grietas y arañazos, los elementos de distancia-

miento causarán señales que estorban si el tamaño en altura y lo afilado del perfil exceden de ciertos valores. Se halla que las dimensiones y los perfiles aquí sugeridos son totalmente aceptables en este sentido. Desde este punto de vista se prefiere el perfil de segmento de círculo (Fig. 4).

La invención se describirá más ahora mediante ejemplos específicos. Sin embargo, se ha de entender que estos ejemplos no han de ser considerados como delimitadores del ámbito de la invención, que en este sentido está definida en las reivindicaciones adjuntas. Desde luego, habrá modificaciones y variaciones evidentes para los expertos en la técnica.

#### Ejemplo 1

Se fabrica un típico elemento de combustible para RAH, del diseño que se ilustra en las Figs. 1 y 2, usando métodos de fabricación usuales establecidos. Unos gránulos de óxido de uranio enriquecidos a aproximadamente 2,5% son sinterizados hasta aproximadamente 95% de la densidad teórica, usando una atmósfera de sinterización de hidrógeno a aproximadamente 1700°C. Los gránulos son rectificadas luego sin pun-

tos hasta las dimensiones especificadas, y secados bajo vacío antes de cargar en el tubo de revestimiento.

5 Tubos de revestimiento hechos de Zircaloy-2, que tienen diámetro interior de 10,70 mm y un espesor de pared de 0,8 mm, son producidos en un tren de reducción de tubo, por mandrinado en etapas. En el paso final se usa un mandril especial que está provisto de 24 diminutos surcos paralelos que se extienden longitudinalmente, mecanizados en la superficie del mandril. Los surcos individuales, uniformemente distribuidos alrededor de la periferia del mandril, tienen todos la misma sección recta y tienen un perfil en forma de campana, con una profundidad de 0,050 mm, una anchura del fondo de aproximadamente 0,10mm y una anchura de la parte superior de aproximadamente 0,40 mm. El paso final utilizando este mandril especial proporcionará en el tubo de revestimiento, sobre su superficie interior los correspondientes nervios que se extienden longitudinalmente, que tienen una anchura en la base de aproximadamente 0,40 mm y una anchura en la parte superior de aproximadamente 0,10 mm, siendo la altura radial de los mismos 0,050 mm. El alma del tubo de revestimiento es tratada con chorro de arena y decapada, e

10

15

20

inspeccionada para determinar posibles defectos como grietas, pliegues, etc. Para este fin se usa equipo usual de ultrasonidos. La pauta de señales causada por los nervios produce un cierto ruido de fondo, que, sin embargo, es lo suficientemente bajo para permitir la detección apropiada de posibles defectos de manera usual. El diseño geométrico del interior del elemento de combustible es el usual, es decir, la holgura radial anular entre gránulo y revestimiento es igual a 0,17 mm (excluyendo la altura radial de los elementos de separación), y la tolerancia en el tamaño de holgura es aproximadamente  $\pm 0,05$  mm. La proporción entre altura de gránulo y diámetro de gránulo es igual a 1,5.

Tras inserción de los gránulos de combustible nuclear en el tubo de revestimiento, se sueldan herméticamente unos tapones extremos de Zircaloy-2 en el tubo de revestimiento, usando soldadura por rayos electrónicos en el vacío. A través de un diminuto agujero en uno de los tapones de los extremos (que no se muestra en la Fig. 1) se introduce helio gaseoso en el espacio hueco del elemento de combustible, y se cierra herméticamente usando soldadura por arco de argón. No se encuentran problemas concretos debidos a la presencia de los nervios salientes, ni duran-

te la carga de los gránulos ni durante la soldadura de los tapones extremos al tubo de revestimiento.

5 Cierta número de elementos de combustible del tipo descrito antes se introduce para irradiación de corta duración en un circuito de agua a presión de un reactor de pruebas, y se hacen funcionar bajo condiciones de presión y temperatura que son representativas de un reactor usual de agua hirviendo, siendo el nivel de potencia, como máximo, 650  
10 w/cm. Para fines de control se irradian simultáneamente algunos elementos de combustible de tipo usual, es decir, que no tienen nervios sobre la superficie interior del tubo de revestimiento.

15 La inspección no destructiva tras la irradiación no revela diferencias significativas en dimensiones exteriores. Para el tubo de revestimiento nervado se observan menos distorsiones en la forma de los rebordes circunferenciales, lo que indica tensiones del revestimiento más pequeñas. Sin embar-  
20 go, el examen radiográfico neutrónico revela una fragmentación más extensa de los gránulos de combustible, lo que indica un sustancial efecto de fracturación de los nervios sobre el gránulo. Este efecto es deseable, en el sentido de que reducirá el pico  
25 de tensión sobre el revestimiento, como resultado de

la interacción mecánica gránulo-revestimiento.

5 Para comprobar la eficacia de los nervios para amarrar los gránulos en su posición axial, los elementos de combustible son vueltos boca arriba y radiografiados neutrónicamente una vez más. Los resultados demuestran claramente que, de hecho, los nervios amarran a los gránulos en su sitio, mientras que los tubos de revestimiento no nervados, de referencia, no lo hacen, es decir, los gránulos caen en alguna medida dentro del espacio vacío disponible en el tubo de revestimiento del elemento de referencia.

15 El examen destructivo tras la irradiación confirma que los nervios de los tubos de revestimiento han sido deformados plásticamente por algún aplastamiento de los picos redondeados de los perfiles del nervio, siendo el aplastamiento circunferencial del orden de 0,1 mm. Además, a menudo se observa en esas posiciones de contacto la formación, antes mencionada, de grietas en los cuerpos del gránulo.

20 Un hallazgo muy importante del examen metalográfico es el hecho de que las temperaturas centrales de los gránulos - según están indicadas por la magnitud diametral de la zona de crecimiento de grano del material del gránulo - permanece casi igual, cuando se compara el elemento de combustible nervado

con el elemento de control no nervado. Aproximadamente la mitad del diámetro está ocupada por zonas de crecimiento de grano en ambos casos, al régimen de calor de aproximadamente 650 w/cm.

5

#### Ejemplos 2-4

De la misma manera descrita en el anterior Ejemplo 1, se fabrican elementos de combustible que están provistos de nervios que se extienden longitudinalmente, que tienen secciones rectas según las Figs. 3, 4 y 5 respectivamente. Se obtienen los mismos resultados ventajosos que los demostrados en el Ejemplo 1, aunque se mejora la transmisión de calor debido a las más anchas superficies de contacto entre gránulos y nervios.

10  
15

Respecto a la realización de la Fig. 4 usando nervios 5 que tienen la forma de un segmento de círculo formado entre la periferia del círculo del alma del tubo de revestimiento y una cuerda, se observarán varias ventajas. Primeramente, como se ha indicado antes, se pueden obtener con grado de exactitud grande alturas radiales muy pequeñas (menos que 0,020 mm) de los nervios, debido a la ventajosa proporción alta entre la anchura circunferencial y la altura ra-

20

25

dial del nervio. Ello, a su vez, permitirá el uso de menores holguras de montaje en frío. En segundo lugar, esta realización facilita mucho el método de disponer en el mandril usado para la fabricación del tubo de revestimiento los rebajes que se extienden longitudinalmente, correspondientes a la sección recta de los nervios 5. Así, se puede hacer un mandril de la forma deseada simplemente rectificando áreas planas a intervalos regulares alrededor de la periferia de un cuerpo circular. Como máximo y con una altura radial dada de los nervios 5, se puede rectificar el mandril para formar un polígono regular, lo que significa que tras el mandrinado no quedan áreas cilíndricas interiores en el interior del tubo de revestimiento. Para aumentar el área de contacto entre gránulo y tubo de revestimiento se puede hacer una pasada final con un mandril cilíndrico que tenga un diámetro exterior algo mayor que el diámetro interior del tubo de revestimiento correspondiente a la máxima altura de nervio, lo que tendrá como resultado unos rebajes cóncavos cilíndricos en las superficies superiores, enfrentadas hacia dentro, de los nervios 5. Tal calibración final de los nervios 5 puede ser también concebida respecto a la realización de la Fig. 3. El resultado de tal operación de dar forma final a la

superficie, enfrentada hacia dentro, de los nervios  
5, tendrá como resultado nuevas mejoras de la trans-  
misión de calor entre gránulos y revestimiento.

5 La presente solicitud que corresponde a la  
presentada en Suecia, el día 2 de Febrero de 1973,  
bajo el número 73-01524-0, se acoge a los beneficios  
del artículo 51 del vigente Estatuto sobre Propiedad  
Industrial.

10

#### REIVINDICACIONES

15 Los puntos de invención propia y nueva, que  
se presentan para que sean objeto de esta solicitud de  
Patente de Invención en España, por VEINTE años, son  
los que se recogen en las reivindicaciones siguientes:

20 1ª.- Perfeccionamientos introducidos en un  
elemento de combustible nuclear para uso en reactores  
nucleares productores de energía, que comprende una plu-  
25 ralidad de cuerpos de combustible cilíndricos cerámicos  
del tipo sinterizado, alineados axialmente, y un tubo  
de revestimiento, de metal o aleaciones metálicas, don-  
de dicho tubo de revestimiento, sobre su superficie ci-  
líndrica interna, está provisto de una pluralidad de ele

mentos de separación que sobresalen ligeramente, distribuidos sobre dicha superficie interna.

5 2ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con la reivindicación 1ª, según los cuales la altura radial de dichos elementos de separación es como máximo aproximadamente 0,1 mm, de preferencia como máximo aproximadamente 0,05 mm.

10 3ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con las reivindicaciones 1ª o 2ª, según los cuales la holgura anular entre los cuerpos de combustible y el tubo de revestimiento, en frío, está comprendida entre aproximadamente la altura radial de los elementos distanciadores y aproximadamente 0,15 mm.

15 4ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1ª - 3ª, según los cuales la altura radial de los elementos de separación es al menos 0,005 mm.

20 5ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1ª - 4ª, según los cuales dichos elementos de separación unos nervios que se extienden axialmente, paralelos entre sí y separados circunferencialmente, donde la distancia circunferencial entre dichos nervios es tal que bajo la deformación plástica del tubo de revestimiento durante el funcionamiento las áreas de tubo entre dichos nervios no son tocadas o solo están ligeramente en contacto con los  
25 cuerpos de combustible.

5 6ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con la reivindicación 5ª, según los cuales el número de nervios es al menos tres, estando dichos nervios distribuidos uniformemente por la superficie interior del tubo de revestimiento.

10 7ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con la reivindicación 5ª, según los cuales cada uno de dichos nervios tiene, en sección recta, la forma de un segmento de círculo formado entre la periferia circular de la superficie interior del tubo de revestimiento y una cuerda.

15 8ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con las reivindicaciones 5ª o 7ª, según los cuales el número de nervios es al menos tres, estando dichos nervios distribuidos uniformemente sobre la superficie interior del tubo de revestimiento, y el máximo número de nervios es tal que formen un contorno interno de la superficie interior del tubo de revestimiento conforme a un polígono regular.

20 9ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con la reivindicación 5ª, según los cuales dichos nervios tienen, en sección recta, una forma como un trapecio paralelo.

25 10ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con la reivindicación 5ª, según los cuales dichos nervios tienen, en sección recta una forma en general triangular con un pico redondeado.

11ª.- Perfeccionamientos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1ª - 10ª, según los cuales los elementos de separación forman parte integrante del tubo de revestimiento.

5 12ª.- Perfeccionamientos introducidos en un elemento de combustible nuclear y para uso en reactores nucleares productores de energía.

Tal y como se ha descrito en la Memoria que antecede, representado en los dibujos que se acompañan y para los fines que se han especificado.

10 Esta Memoria consta de cuarenta y cuatro hojas escritas a máquina por una sola cara.

Madrid, 29 JUN 1977

15

P.A. Alberto de Eizaburu  
Por Poderes

27.6.77

- 44 -

TGG.

70600

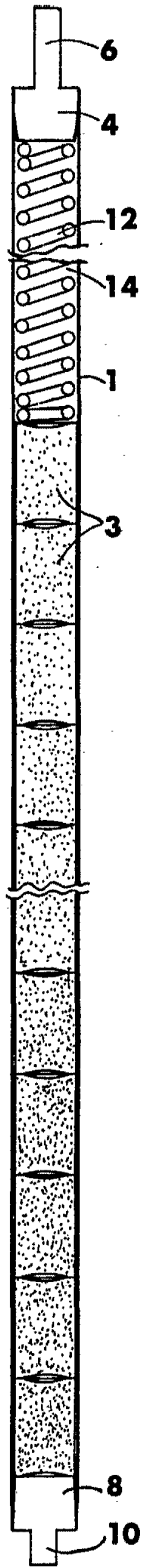


Fig. 1

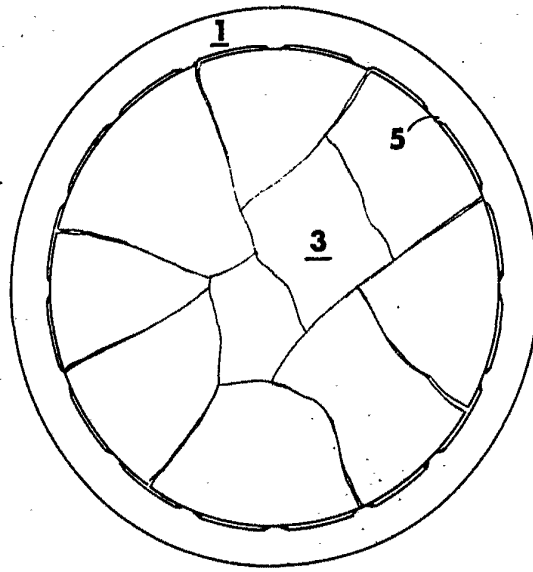


Fig. 2

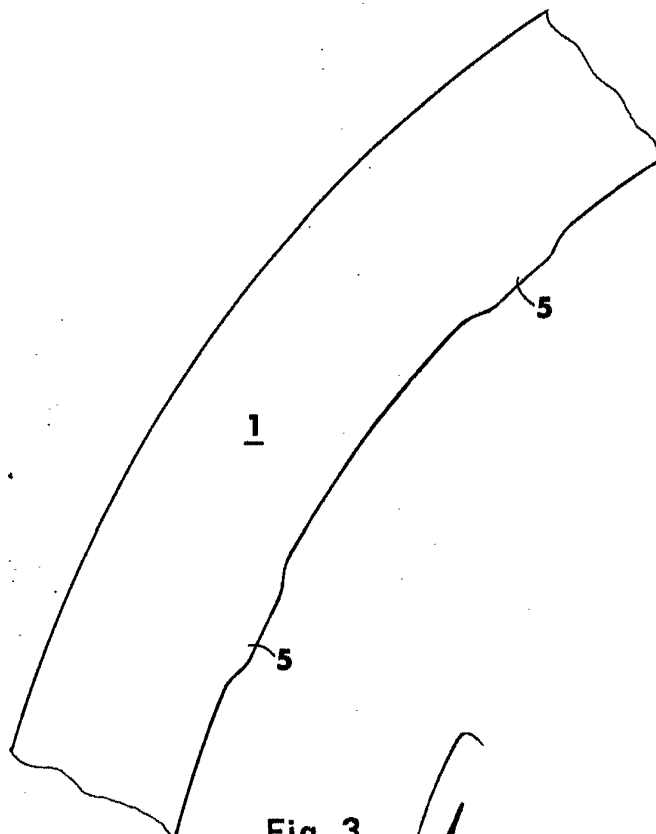


Fig. 3

Alberto de la Torre  
Por Poder

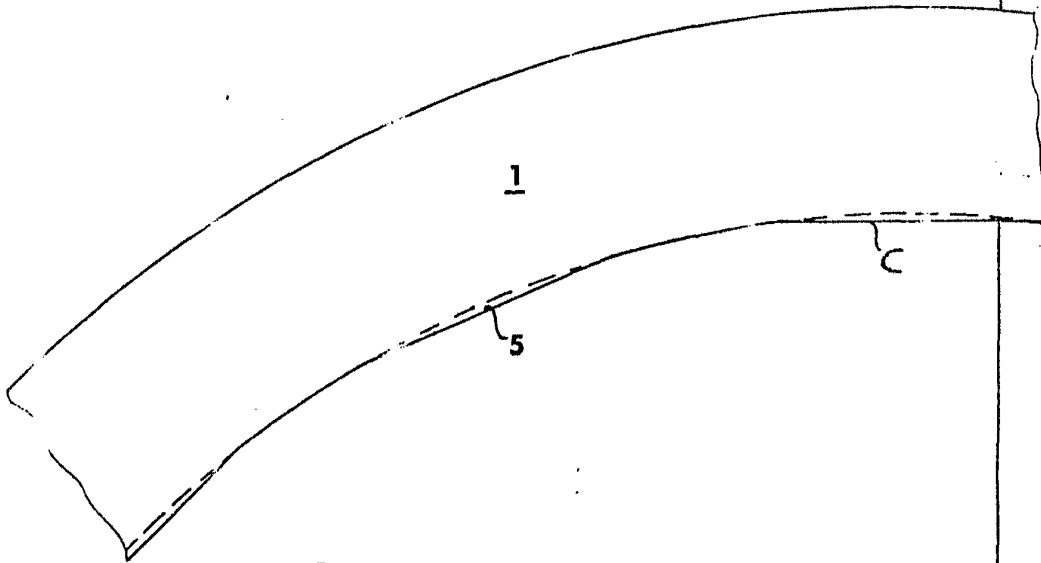


Fig. 4

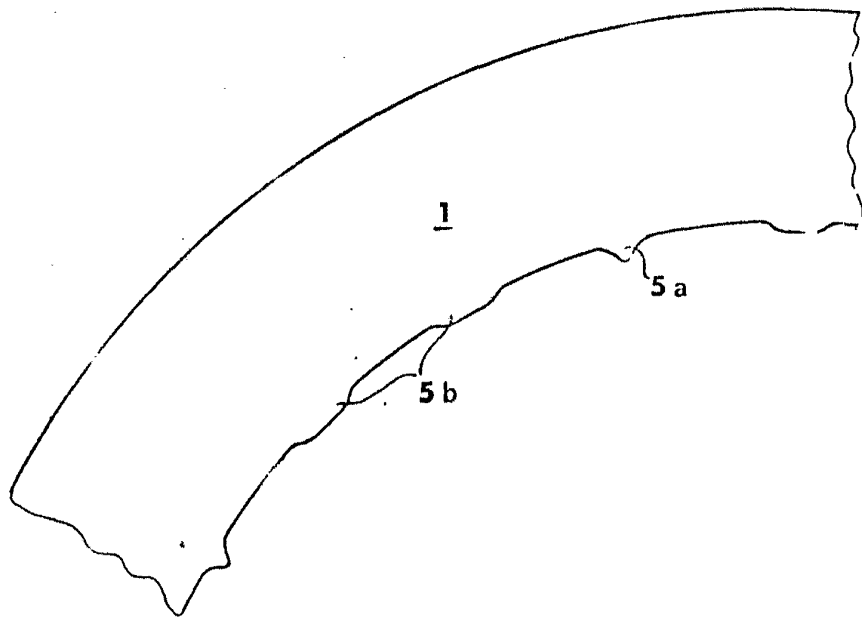


Fig. 5

Alberto de Elizalde  
Tnt. Podes.

1101 v.

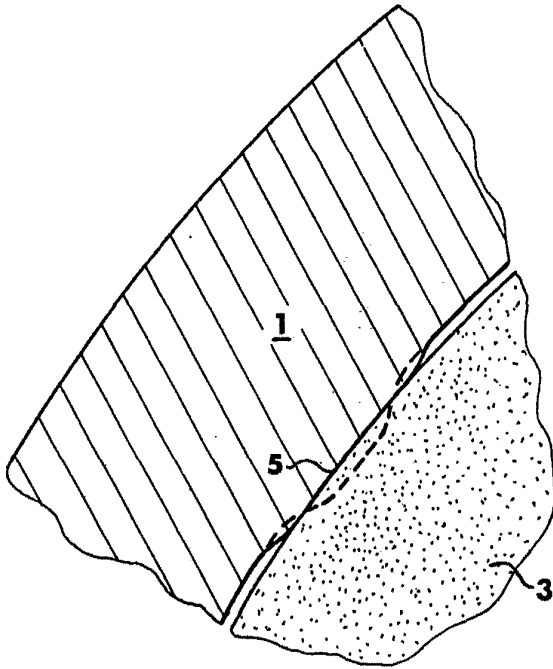


Fig. 6

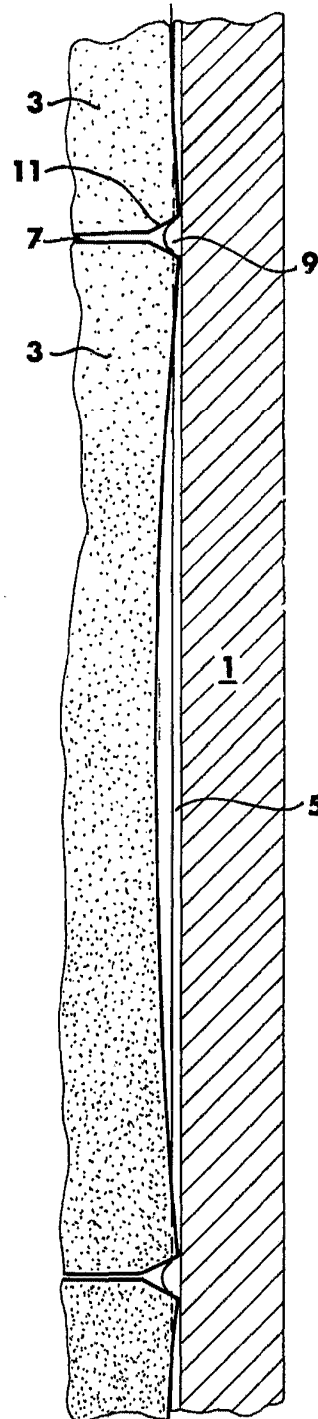


Fig. 7

Alberto de Ezaburu  
Per Fodur