



335669

MEMORIA DESCRIPTIVA.-
=====

PATENTE DE INVENCION.

P A I S : ESPAÑA.

DURACION : 20 AÑOS.

OBJETO : "UNA DISPOSICION DE CONJUNTO DE
"COMBUSTIBLE PARA REACTOR NUCLEAR".

=====

A nombre de : GENERAL ELECTRIC COMPANY.

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

Nacionalidad : ESTADOUNIDENSE.

(P. 2.615.- CG.)
(Dkt. 24D-703/24D-891)



335609

El presente invento se refiere en general a un perfeccionamiento en los reactores de escisión o fisión nuclear y, más particularmente, a un conjunto de combustible nuevo para uso con tales reactores nucleares de escisión.

- 5.- La liberación de grandes cantidades de energía por las reacciones de escisión nuclear es, en la actualidad, cosa bien conocida. En general, un átomo escindible o fisionable, tal como U^{233} , U^{235} , Pu^{239} ó Pu^{241} absorbe un neutrón en su núcleo y sufre una desintegración nuclear. Esta da por término medio 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 acerca a 200 mev (millones de electrón-voltios) por escisión.

- 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, queda al menos un neutrón neto que induzca una escisión subsiguiente, la reacción de escisión se mantiene por sí misma y la generación de calor es continua. El calor es evacuado haciendo pasar un refrigerante en relación de intercambio térmico con el combustible. La reacción puede continuarse mientras exis-

- 335669



ta suficiente material escindible en el combustible para vencer los efectos de los productos de escisión y otros absorbedores de neutrones, tales como las barras de mando reguladoras de la escisión, 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, están siendo diseñados en la actualidad, construídos y hechos funcionar, reactores nucleares en los cuales el material escindible (combustible nuclear) está contenido en elementos combustibles, que pueden tener diversas formas, tales como placas, tubos o barras. En gracia a la conveniencia, estos elementos combustibles serán denominados en lo que sigue "barras combustibles". Estas barras combustibles están provistas usualmente sobre sus superficies externas de un revestimiento no reactivo, resistente a la corrosión, que contiene o no material escindible o fértil. Las barras combustibles son agrupadas a distancias fijas una de otra en un canal o región de circulación del refrigerante, en forma de conjunto o haz combustible, y un número suficiente de estos conjuntos o haces combustibles se combinan para formar el núcleo del reactor, capaz de la reacción de escisión automantenida, a que antes se ha hecho referencia. El núcleo, usualmente, está encerrado dentro de una cuba de reactor.

- 40.-
- 45.-
- 50.- En general, las centrales nucleares están proyectadas para detener periódicamente su funcionamiento con objeto de reponer de combustible el núcleo del reactor. Esto se denomina "recargar" el reactor y se realiza reponiendo parte o la totalidad del combustible irradiado con una nueva carga de combustible sin usar. Típicamente, el programa de recarga se arregla para detener el reactor durante aquellos perio-
- 55.-

- 335669



14

dos en que las demandas de corriente en la red son mínimas. La recarga programada puede, típicamente, requerir la retirada de un 20-25% del combustible irradiado del núcleo del reactor y su sustitución con el combustible de nueva carga.

60.- Por consiguiente, para recargas anuales del 25%, habrá cuatro paradas de recarga, lo que dá como resultado la sustitución completa del combustible original al cabo de cuatro años de funcionamiento normal.

El proyecto nuclear del combustible de recarga se establece muchos meses (no es raro que sean 12 meses) antes de la carga del combustible en el reactor. La mayor parte de este tiempo de adelanto se necesita para el proyecto nuclear, la fabricación, la prueba y la entrega del combustible de recarga. Es muy importante observar que el proyecto nuclear del combustible de recarga se base en el estado del reactor que se prevé que existirá en la fecha de la recarga programada. Las condiciones básicas que deben considerarse al proyectar el combustible de recarga son: (1) el estado de reactividad del núcleo del reactor y del combustible remanente; (2) la vida proyectada y la reactividad del combustible de recarga; (3) la fuerza de las barras de control o de mando (la eficacia en la absorción de neutrones por parte de las barras de mando); y (4) el margen de parada deseado (la fuerza del sistema de las barras de mando sobre y por encima de la requerida para detener el reactor.)

65.-

70.-

75.-

80.-

Como el combustible de recarga se proyecta muchos meses de antemano, existe una probabilidad sustancial de que el proyecto nuclear no satisfaga estrictamente las necesidades del reactor en el momento de la parada del mismo si ocurrieran desviaciones inesperadas respecto de las condiciones origina-

85.-



riamente previstas. Tales desviaciones pueden resultar, por ejemplo, de funcionamiento a niveles de potencia por encima o por debajo del supuesto para ese período. Desde un punto de vista del funcionamiento económico, sería muy deseable cambiar las características del combustible de recarga para acomodarse a estas desviaciones con el fin de que el combustible de recarga satisfaga las necesidades del reactor en la medida mayor posible. Una vez que el combustible de recarga ha sido fabricado según un proyecto correcto para las condiciones supuestas del reactor, sólo se ha dispuesto, con anterioridad al presente invento, de técnicas muy limitadas y laboriosas para cambiar las características nucleares del combustible de recarga para acomodarlo a las desviaciones respecto de las condiciones supuestas, de modo que sean satisfechas las necesidades del reactor con las que se tropiece realmente en el momento de la parada para la reposición del combustible. En tales situaciones, el tiempo y los gastos precisos para alterar los haces de combustible para la recarga pueden ser tales que se necesite el uso de combustible de recarga sin modificar en condiciones inefectivas. Puede ser necesario también que se cambien, sin haberlo programado, las barras de mando con el fin de aumentar o de disminuir su valor de reactividad, o puede ser necesario reagrupar los haces de combustible en el núcleo, o ambas cosas. A menudo, estas situaciones exigen gastos excesivos de dinero, paradas prolongadas de la central nuclear u otros inconvenientes, que son perjudiciales para el funcionamiento económico y eficaz de una central nuclear.

El objeto del presente invento es el de superar todos estos problemas proporcionando un haz o conjunto de combustible cuyas características nucleares pueden alterarse fácil y eco-

- 6 - 335669



nómicamente dentro de límites relativamente amplios en el lugar en que está el reactor para acomodarlo a las desviaciones de las características del reactor que se había supuesto existirían algunos meses antes y sobre las cuales se basó el proyecto del combustible de recarga.

- 120.- En pocas palabras, el presente invento comprende un haz o conjunto de combustible básico que tiene una pluralidad de barras de combustible, incluyendo una o más barras, fácilmente separables, especiales, de absorbedor de neutrones (denominadas en lo que sigue "barras separables") situadas en uno o más lugares en el haz de combustible sustancialmente a lo largo de una línea de posiciones de barras que interseca el eje longitudinal del haz de combustible y cuya prolongación interseca el eje longitudinal de una barra de mando adyacente.
- 125.- En un haz o conjunto cuadrado de combustible, esta línea viene representada por una diagonal que interseque la esquina del haz de combustible más cercana al eje longitudinal de una barra de mando adyacente y la esquina opuesta del haz de combustible. En gracia a la conveniencia, esta línea de posiciones de barra será denominada diagonal en el contexto de haces o conjuntos cuadrados. Además, las barras separables pueden estar situadas simétricamente a cada lado de la línea o diagonal. Dependiendo del efecto deseado, cada una de las barras separables está llena (en su totalidad o parcialmente)
- 130.- con un material especial que puede incluir cualquiera de los siguientes: (1) combustible con un enriquecimiento igual a o diferente del resto de las barras; (2) material combustible mezclado con un absorbedor especial de neutrones; (3) material inerte o diluyente (tal como alúmina, óxido de circonio, etc.) mezclado con un absorbedor especial de neutro-
- 135.-
- 140.-
- 145.-



nes; (4) un material especial absorbedor de neutrones sin adiciones.

- Se ha descubierto que colocando apropiadamente barras separables en las regiones arriba especificadas, puede ajustarse la fuerza de la barra de control adyacente o la reactividad del haz de combustible, o ambas cosas. Por ejemplo, la fuerza de la barra de mando adyacente puede aumentarse, en comparación con su fuerza si se hubiera usado el haz de recarga sin modificar, disponiendo una barra separable llena de absorbedor especial de neutrones en la diagonal en la esquina opuesta a la barra de mando. Esto tiene el efecto de "volcar" o inclinar el diseño del flujo neutrónico en torno del centro del haz de combustible, es decir, de rebajarlo junto a la barra separable y de subirlo junto a la barra de mando. También, la fuerza de la barra de mando puede disminuirse colocando esta barra separable que contiene absorbedor en la diagonal en la esquina adyacente a la barra de mando. Se ha visto que es posible también aumentar la reactividad global del haz combustible sin afectar sustancialmente a la fuerza de la barra de mando adyacente, colocando apropiadamente barras separables que contienen material combustible enriquecido. Además, es posible disminuir la reactividad global del haz combustible, sin afectar sustancialmente a la fuerza de la barra de mando adyacente, colocando apropiadamente barras separables que contienen un absorbedor de neutrones o un combustible menos enriquecido que el sustituido. Una barra separable, que contiene absorbedor, apropiadamente colocada, puede añadirse también para eliminar por completo cualquier diferencia en el efecto sobre la fuerza de la barra de mando adyacente. Además, las características de la vida de reacti-
- 150.-
- 155.-
- 160.-
- 165.-
- 170.-
- 175.-

- 8 335669



180.- tividad del haz de combustible pueden variarse cambiando la densidad atómica (es decir, átomos por unidad de volumen) en la barra separable que contiene absorbedor. Todavía, la capacidad de absorción de neutrones de la barra separable que contiene absorbedor puede variarse alterando el diámetro efectivo del absorbedor dentro de la barra separable al tiempo que se mantiene uniforme el diámetro exterior de la barra separable.

185.- Debe observarse que en ciertas situaciones puede ser deseable reemplazar las barras separables de algunos o de todos los haces de combustible irradiados cuando estos haces no tienen aun programada su sustitución con combustible de recarga. Esto podría ocurrir, por ejemplo, si la parada programada de la central se hubiera aplazado y, por tanto, se hubiera prolongado el funcionamiento del reactor. En estas condiciones,

190.- los haces de combustible de recarga (fabricados muchos meses de antemano) pueden no tener reactividad suficiente para excitar el núcleo del reactor a niveles de potencia de funcionamiento normales para el período de tiempo requerido. Si,

195.- además de cargar los haces de combustible de recarga, la reactividad de algunos de los haces de combustible irradiados pudiera aumentarse también, su vida, y la del núcleo, podrían ampliarse. En muchos casos, puede conseguirse un aumento suficiente en la reactividad reemplazando alguna o la totalidad

200.- de las barras separables de algunos o de todos los haces de combustible irradiados con barras separables que contienen material combustible enriquecido para lograr la ampliación de vida necesaria. El presente invento resulta especialmente apropiado para esta finalidad ya que se dispone de una gran

205.- variedad de barras separables enriquecidas y pueden insertar-



se en los haces de combustible mientras los haces de combustible permanecen en el núcleo del reactor. La posibilidad de reemplazar barras separables con rapidez mientras los haces de combustible se hallan en el núcleo del reactor es particularmente importante. Si no fuera posible esta rápida sustitución, los gastos y los retrasos serían en general tan grandes como para necesitar el cambio de algunos de los haces de combustible, con combustible de recarga adicional. Esto da como resultado un aumento sustancial en el coste de la operación debido a la retirada, sin utilización, de haces de combustible que tienen todavía capacidad de producción de energía.

En la práctica real, puede mantenerse una reserva central de barras separables que incluya barras separables de concentraciones distintas en absorbedor de neutrones, radios de absorbedor distintos, y enriquecimientos distintos en material escindible. De este modo, es posible tener disponible inmediatamente, para una central nuclear que ha sido o está a punto de ser parada, la combinación de barras separables necesaria para su inserción en los haces irradiados y/o de recarga.

Debe observarse que el concepto de haz de combustible con barras separables descrito en lo que antecede, de acuerdo con el presente invento, puede usarse con varios tipos de haces de combustible de diseño cuadrado, por ejemplo, grupos cuadrados que tienen barras de combustible dispuestas en diseños de 5 x 5, 6 x 6, 7 x 7, 8 x 8, etc. Además, el concepto de haz de combustible con barras separables del presente invento puede usarse con haces de combustible que tengan grupos distintos de los cuadrados, por ejemplo, exagonales, rectan-



335669

gulares, o similares.

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

240.- La figura 1 es un diagrama esquemático u organigrama de una central nuclear típica que muestra la cuba del reactor en sección parcial y en la cual puede ser empleado el haz de combustible del presente invento.

245.- La figura 2 es una sección horizontal de la cuba del reactor y del núcleo, tomada por la línea 2-2 de la figura 1.

La figura 3 es una vista a escala ampliada de la parte superior del haz de combustible dada por la línea 3-3 de la figura 2, e ilustra una realización del haz de barras de combustible con barras separables del presente invento.

250.- La figura 4 es una vista isométrica en corte parcial de otra realización del haz de combustible del presente invento.

La figura 5 es una vista desde arriba de la placa-tirante superior del haz de combustible de la figura 4.

255.- La figura 6 es una vista isométrica a escala ampliada de las aberturas para las barras separables de la placa-tirante superior mostrada en la figura 5.

La figura 7 es una vista dada por la línea de sección 7-7 de la figura 6.

260.- La figura 8 es un alzado lateral de una realización de barra separable que es adecuada para uso con el haz de combustible de las figuras 4 y 5.

La figura 9 es una vista de extremidad de la barra separable de la figura 8.

265.- La figura 10 es un diagrama que ilustra la variación



del flujo de neutrones a lo largo de la diagonal del haz de combustible.

270.- La figura 11 es un diagrama que ilustra la reactividad incontrolada del haz con (curva I) y sin (curva III) la barra de mando móvil insertada y la reactividad incontrolada del haz en función de la posición de la barra con absorbedor en el haz de combustible.

275.- La figura 12 es un grupo de curvas que ilustran la reactividad incontrolada del haz y la exposición de agotamiento por fisión en función de variaciones discontinuas en el radio del material absorbedor y en la concentración del material absorbedor.

280.- La figura 13 es un grupo de curvas que ilustran la fuerza de la barra de mando en función de barras separables que contienen absorbedor situadas a lo largo de la diagonal del haz de combustible del presente invento.

Las figuras 14 a 17 ilustran las posiciones de barras separables que corresponden a los ejemplos 1 a 4, respectivamente.

285.- En la figura 1 se ha ilustrado esquemáticamente un organigrama de una central nuclear típica en la cual puede emplearse el haz de combustible del presente invento. Ha de entenderse que las enseñanzas del presente invento pueden usarse con muchos tipos diferentes de centrales nucleares tales como los tipos de agua no hirviente, los de moderador de agua pesada y moderador de grafito, los de moderador orgánico, o los tipos que emplean sodio u otros flúidos como moderador-refrigerante. Sin embargo, el invento se describe aplicado a un reactor de agua hirviente ya que ha resultado ser particularmente útil con este tipo de reactor.

290.-

295.-



El sistema de reactor mostrado en la figura 1 incluye la cuba de presión 10 del reactor provista de la cabeza desmontable 12 que está asegurada por medio de las bridas 14 y 16. Dispuesto dentro de la cuba de presión 10 hay un núcleo 18 de reacción en cadena que incluye una pluralidad de haces de combustible 20 situados verticalmente. Cada haz combustible consiste en una pluralidad de barras de combustible que se extienden longitudinalmente y que están situadas en relación espaciada por medio de herrajes superiores e inferiores que tienen aberturas para permitir la circulación del refrigerante. Cada haz está provisto de un canal de circulación de extremos abiertos que rodea a las barras de combustible.

Una pluralidad de manguitos 22 para el accionamiento de las barras de mando se extienden de modo estanco a través del testero inferior 23 de la cuba del reactor y están conectados a él por soldadura o similar. Una pluralidad de tubos de guía 24 para las barras de mando, que se extienden longitudinalmente, tienen sus extremos inferiores asegurados a los extremos superiores de los manguitos de accionamiento 22 y están soportados vertical y lateralmente por ellos. Los extremos superiores de los tubos 24 de guía de las barras de mando están lateralmente soportados por la placa de enrejado inferior 26. La extremidad superior de cada tubo de guía de barra de mando está provista de cuatro alvéolos (no mostrados) y de una abertura cruciforme (no mostrada). Cuatro haces 20 están soportados por cada tubo 24 de guía de barra de mando, estando el herraje inferior de cada haz montado en uno de los cuatro alvéolos. Cada tubo de guía de barra de mando está provisto de aberturas 28, situadas cerca del extremo superior, que comunican con la cámara de alimentación 30 y con los alvéolos y



los herrajes inferiores de los haces de combustible asociados.

- Las barras de mando 32 (mostradas en líneas de trazos) controlan la potencia global, así como la distribución local de la potencia del reactor. Una barra de mando de forma de curv
- 330.- está situada en cada tubo de guía de barra de mando y está destinada a ser movida verticalmente entre los cuatro haces de combustible 20 asociados que descansan sobre el tubo de guía. Las barras de mando son introducidas y sacadas del núcleo del reactor por árboles 33 de accionamiento de las barras.
- 335.- de mando (mostrados con líneas de trazos) que se extienden dentro de los respectivos manguitos 22 de accionamiento de las barras de mando. Los árboles de accionamiento de las barras de mando son operados selectivamente por mecanismos de accionamiento individuales (no mostrados) que regulan las posiciones de las barras de mando en el núcleo del reactor. Descripciones detalladas de mecanismos de accionamiento que pueden usarse para accionar las barras de mando antes descritas se exponen en la patente de los EE.UU. No. 3.020.887 de Robert R. Hobson y col., expedida el 13 de Febrero de 1962.
- 340.-
- 345.- Una cubierta 34 está montada coaxialmente dentro de la cuba para crear un anillo de bajada 36 entre la cubierta y la pared de la cuba. El agua de recirculación es retirada continuamente del fondo del anillo de bajada 36 por la bomba 38 e introducida en la cámara de alimentación 30.
- 350.- En el funcionamiento de un reactor típico de agua hirviente, una mezcla de agua y vapor generada en el núcleo 18 es descargada en la cámara 27 desde la cual la mezcla pasa hacia arriba a los separadores de vapor 40. Aquí, el vapor es separado de la mayor parte del agua. El vapor de agua separado sube al secador de vapor 42, montado sobre el miembro
- 355.-



anular de soporte 44, que retira el agua restante. El vapor seco que abandona el secador es llevado luego a la turbina 46 que mueve el generador eléctrico 48. El agua descargada de los separadores 40 y del secador 42 baja y circula radialmente hacia fuera a través de la parte alta de la cámara 27 y entre los separadores en dirección al anillo de bajada 36. La línea de trazos 50 ilustra el nivel del agua.

El vapor de escape procedente de la turbina 46 es condensado y recogido en el pozo 52 del condensador. El condensador retirado del pozo por la bomba 54, y es bombeado como agua de alimentación a la ducha anular 56, mezclándose así el agua de alimentación con el agua que fluye desde los separadores 40 y desde los secadores de vapor 42. La bomba de recirculación 38 transfiere el agua de recirculación desde el extremo inferior del anillo de bajada 36 y la devuelve a la cámara de alimentación 30 a mayor presión. A causa de este aumento de presión, el flujo del agua de recirculación es hacia arriba desde la cámara de alimentación 30, sucesivamente a través de los haces de combustible 20, la cámara 27, los separadores de vapor 40, la cámara superior 58, el anillo de bajada 36 y de nuevo a la entrada de la bomba de recirculación 38. Se comprenderá que el bombeo de recirculación puede también realizarse por bombas de chorro o inyectores situadas en el anillo de bajada 36.

En la práctica real, el agua que circula desde la cámara de alimentación 26 se divide en dos corrientes paralelas. La primera, consistente en aproximadamente 90% de la circulación total procedente de la cámara de alimentación 30, pasa sucesivamente por las aberturas 28 en la parte alta de los tubos de guía 24 de las barras de mando, los herrajes inferiores



335669

de los haces de combustible, entrando y pasando por los canales de circulación de los haces de combustible, a través de los herrajes superiores de los haces de combustible y dentro de la cámara 27. Dentro de los canales de circulación, la corriente de agua sirve como moderador-refrigerante para las barras de combustible y en el proceso es vaporizada parcialmente para formar la mezcla de agua y vapor.

La segunda corriente, denominada comunmente flujo de fugas de derivación y que consiste en el 10% restante del flujo de agua procedente de la cámara de alimentación 30, pasa por las aberturas anulares 59 formadas entre las superficies exteriores en los extremos superiores de los tubos de guía de las barras de mando, 24, y las aberturas asociadas de la placa de rejilla inferior 26. Este agua circula hacia arriba por los espaciados formados entre el exterior de los canales de flujo de los haces de combustible y las barras de mando 32 y se descarga en la cámara 27 por los espacios formados entre los extremos superiores de los canales de los haces de combustible. Este agua sirve para enfriar las barras de mando y los canales de los haces de combustible para impedir la formación de vapor en esta región. Este agua contribuye también al efecto moderador de los neutrones del agua que pasa dentro de los canales de circulación y tiene un efecto sustancial sobre el funcionamiento del reactor, como luego resultará más evidente.

La calidad de la mezcla vapor-agua resultante de la combinación de las corriente primera y segunda en la cámara 27 es típicamente de aproximadamente 10%.

En la figura 2 se ve una sección transversal de la cuba de presión 10 del reactor tomada por el núcleo al nivel 2-2 mostrado en la figura 1. La cuba 10 del reactor se muestra



335669

- rodeando al núcleo 18 y a la cubierta 34. Los haces de combustible 20 están reunidos en grupos de cuatro con espacios (N) relativamente estrechos entre ellos para facilitar la inserción de los haces de combustible y su retirada y para dar
- 420.- zonas para el trabajo de dispositivos. Unos espacios (W) considerablemente más amplios están formados entre los haces de combustible de cada grupo para recibir barras de mando 32 cruciformes situadas con movimiento de vaivén entre ellos. Así, dos lados de cada haz de combustible tienen superficies
- 425.- de lámina de barra de mando adyacentes y dos lados no las tienen. Los espacios (N) y (W) entre el combustible forman el espacio a través del cual circulan las fugas de derivación del núcleo (la segunda corriente de agua) y, así, están llenos de agua.
- 430.- La figura 3 es una parte agrandada de la vista en planta de la figura 2 de la parte rodeada por la línea 3-3. Esta figura muestra más claramente la forma de cruz de una barra típica de mando 32 y muestra en general las posiciones de las barras separables de una realización del presente invento.
- 435.- La realización del haz de combustible mostrada en la figura 3 consiste en un grupo de 6 x 6 barras de combustible dispuestas en diseño cuadrado y con ocho posiciones para barras separables. Debe señalarse particularmente que seis de las posiciones de las barras separables (A, B, C, D, E y F) están
- 440.- a lo largo de la diagonal 68, que interseca el eje longitudinal de la barra de mando 32 y del haz de combustible 20 y, así, se extiende desde la esquina adyacente del haz de combustible a la esquina opuesta del haz de combustible y que las otras posiciones de las barras separables (G y H) están
- 445.- situadas simétricamente en lados opuestos de la diagonal 68

-17-
335669



1967

y, en esta realización, a lo largo de la diagonal 72. Las razones para esta disposición y otras disposiciones y realizaciones alternativas se consideran en detalle en lo que sigue.

- 450.- En la figura 4, se ilustra otra realización del haz de combustible del presente invento. En contraste con la realización mostrada en la figura 3, esta realización incorpora solamente seis aberturas de barra separable. El haz de combustible 20' consiste en general en el canal tubular 74 de
- 455.- extremos abiertos, las barras de combustible 76, la placa-tirante inferior 78, la placa-tirante superior 80, y los dispositivos espaciadores 82 de elementos combustibles. Las barras combustibles 76 (con inclusión de las barras separables 76' insertadas a través de las aberturas B, C, D, E, G y H
- 460.- para las barras separables) se extienden a través de los dispositivos espaciadores 82 para los elementos combustibles y están soportadas en relación espaciado por ellos, cuyos espaciadores descansan contra la superficie interior del canal tubular 74. Estos dispositivos espaciadores para las barras
- 465.- combustibles están separados unos de otros en una distancia predeterminada a lo largo del haz, por ejemplo, 45 cm, y están conectados a una o más de las barras de combustible para impedir movimientos longitudinales. Esta conexión puede lograrse por diversos medios, tales como la unión de dispositivos de bloqueo a la barra de combustible a estas mismas distancias predeterminadas.
- 470.-

Cada barra de combustible 76 comprende un tubo alargado que contiene un material combustible escindible tal como dióxido de uranio enriquecido (UO_2). En el caso de las barras

475.- separables, los tubos pueden estar llenos con un material es-

335669



pecial que puede incluir cualquiera de los siguientes: (1) material combustible que tiene la misma cuantía de enriquecimiento, o diferente, que las otras barras de combustible del haz, (2) material combustible enriquecido mezclado con un absorbedor especial de neutrones, (3) material inerte o diluyente (tal como alúmina, óxido de circonio, etc.) mezclado con un absorbedor especial de neutrones, (4) un material especial absorbedor de neutrones sin adiciones, dependiendo del efecto a conseguir. El material combustible está típicamente, en forma de gránulos de alta densidad colocados extremo contra extremo en el tubo; sin embargo, puede tener la forma de una masa densificada de polvo o partículas de gran densidad. Cada extremo del tubo está cerrado herméticamente para impedir que el refrigerante toque el combustible y para impedir que los productos de la escisión escapen de la barra de combustible.

Los extremos inferiores de las barras de combustible están soportados por la placa-tirante inferior 78 y coinciden con receptáculos 84 formados en parte a través de la placa-tirante. Unas aberturas 86 están situadas junto a estos receptáculos y comunican directamente con la abertura inferior 88. El extremo inferior del canal tubular 74 ajusta en torno del extremo superior de la placa-tirante. El extremo inferior de la placa-tirante es un herraje estrechado de transición que termina en una pieza de morro abierta 89 de sección circular y, cuando está montado, en el reactor, descansa sobre y en uno de los alvéolos situados en la parte alta de un tubo de guía de barra de mando, 24, de la figura 1. Cuando el haz de combustible está montado en el reactor, la abertura inferior 88 comunica con la cámara de alimentación 30 de



335669

la figura 1.

Varias barras de combustible, tal como las denotadas por el núcleo de referencia 90, están situadas en las esquinas y tienen prolongaciones roscadas que se extienden a través de la placa-tirante superior 80 y están aseguradas a la placa por medio de tuercas 92. Unos receptáculos 94 de soporte de barra combustible están formados a través de la placa-tirante superior y reciben los extremos superiores de las barras de combustible. Unos muelles de compresión 98 están previstos para mantener una carga, que es determinada por el par aplicado a las tuercas 92, entre la placa-tirante superior 80 y el resalto superior de los elementos combustibles 76. Unas aberturas 96 están hechas en la placa-tirante superior 80, entre los receptáculos 94 que reciben los extremos de las barras de combustible, para poner en comunicación el interior del haz de combustible con la cámara de descarga del reactor. La placa-tirante superior 80 está provista también de dos empuñaduras 100 que están destinadas a facilitar la subida y la bajada del haz combustible 20 en el núcleo del reactor. Las empuñaduras pueden hacerse separadas de la placa-tirante o de una pieza con ella y están situadas en relación paralela y a lo largo de los bordes opuestos de la placa-tirante. Usando dos empuñaduras separadas y paralelas de esta manera puede tenerse un estorbo mínimo para el acceso a las barras separables en las posiciones deseadas en los haces de combustible. Las empuñaduras pueden proveerse de miembros de soporte de interconexión para mayor resistencia y rigidez.

En la figura 5 se ilustra una vista agrandada desde arriba de la placa-tirante superior 80 de la figura 4. La placa-tirante incluye seis aberturas B, C, D, E, H y G para barras



335669

separables cuyos detalles se muestran en la vista isométrica de la figura 6 y en la sección de la figura 7 tomada por 7-7 de la figura 6. Cada una de las aberturas para las barras separables está formada por un miembro cilíndrico alargado 103 que incluye la ranura 104 que se extiende en toda la longitud del miembro cilíndrico 103 (así como en el espesor de la placa-tirante) y la entalladura 106 que está dispuesta 180° frente a la ranura 104 y se extiende hacia arriba en una corta distancia desde la parte inferior del miembro 103. La ranura y la entalladura de cada abertura de barra separable cooperan con la barra separable mostrada en la figura 8.

Con referencia a la figura 8, la barra separable 76' incluye una región cilíndrica alargada 110 que contiene el material nuclear a que antes se ha hecho referencia. El extremo inferior de la región de combustible está cerrado por el tapón inferior 112. El tapón inferior incluye la región de morro ojival 114 para inserción en el receptáculo 84 para la barra de combustible de la placa-tirante inferior, una región cilíndrica 116 que tiene un ajuste radial estrecho con el receptáculo 84, y la región cónica 118 que descansa contra la superficie superior de la placa-tirante junto al receptáculo. El extremo superior de la región de combustible 110 de la barra de combustible 76' está cerrado por el tapón extremo superior 120 que se estrecha hacia arriba y tiene un cuerpo cilíndrico longitudinal 122 provisto del collarín 129 conectado en su extremo superior. El manguito cilíndrico de bloqueo 124 rodea al cuerpo 122 y está montado a deslizamiento y rotación sobre él. El extremo inferior del manguito de bloqueo 124 está provisto de la espiga 126 que se extiende



335669

radialmente hacia fuera desde el extremo inferior del manguito. La extremidad superior del manguito está provista de la tuerca 128 y de una ranura circunferencial 130. Un muelle de compresión 132 está dispuesto alrededor del cuerpo 122 entre el extremo inferior del manguito de bloqueo 124 y la sección estrechada del tapón extremo 120 para bloquear a la fuerza el manguito 124 hacia arriba contra el collarín 129. El mecanismo de bloqueo 135 de la barra separable mostrada en la figura 8 incluye la tuerca 128, la garganta 130, el manguito de bloqueo 124, la espiga 126 y el muelle de compresión 132 cuya función describiremos todavía. Una ranura 136 está formada en el extremo del vástago 122 para dar medios para hacer girar la barra de combustible.

La colocación de una barra separable 76' en el haz de combustible de este invento se realiza, sucesivamente, (1) insertando la barra separable dentro de una de las aberturas B, C, D, E, G o H mostradas en las figuras 4 a 7, (2) haciendo girar el mecanismo de bloqueo 135 de modo que la espiga 126 coincida con la ranura 104, (3) forzando el mecanismo de bloqueo hacia abajo contra el muelle de compresión 132 de modo que la espiga 104 pase hacia abajo completamente a través de la ranura 104, (4) haciendo girar el manguito 124 en 180° hasta que la espiga 126 coincida con la entalladura 106, y (5) soltando el mecanismo de bloqueo de modo que el muelle 132 fuerce a la espiga 104 hacia arriba a aplicación con la entalladura 106. La espiga permanece en aplicación bloqueada con la entalladura 106 ya que el muelle de compresión 132 mantiene esta fuerza contra el mecanismo de bloqueo en dirección ascendente. La separación de la barra separable supone la secuencia inversa de las operaciones que acabamos de mencionar.

El mecanismo de bloqueo puede cogerse y hacerse girar mediante un útil apropiado que está destinado a coger la tuerca 128. La ranura 130 está prevista de modo que pueda insertarse un útil adecuado en encaje con la ranura para dar un bloqueo positivo entre el útil y la barra separable de tal modo que la barra separable pueda ser cogida de manera imperativa para su elevación y giro. Ha de comprenderse que la entalladura 106 puede estar desplazada de la ranura 104 en cualquier ángulo conveniente.

605.- La realización mostrada en las figuras 4 y 5, tiene sólo cuatro posiciones para barra separable a lo largo de la diagonal. Esto es así porque las empuñaduras 100 cubren las aberturas A y F de esquina (véase la figura 4) y, por tanto, no podrían usarse barras separables en estas esquinas. Podrían crearse diseños alternativos de empuñadura que permitieran el acceso a estas aberturas, permitiendo con ello que hubiera aberturas para barras separables en todas las posiciones A, B, C, D, E, F, G y H, como se mostró en la realización de la figura 3.

615.- El haz combustible del presente invento hace posible ajustar importantes características nucleares del haz de combustible para satisfacer una amplia gama de exigencias del reactor por la inserción de cualquiera de una variedad de barras separables como antes se ha dicho. La explicación física siguiente se dá para permitir una mejor apreciación y comprensión de la forma en la cual pueden aplicarse las barras separables del presente invento para usarlas con haces de combustible del presente invento.

625.- La fuerza fija de un sistema de mando (haces de combustible que contienen barras separables con absorbedor de neu-

335669



trones) se denomina $(\frac{\Delta k}{k_F})$ y puede darse mediante la expresión:

$$(1) \quad \frac{\Delta k}{k_F} = \frac{\Omega}{1 + \Omega}$$

630.-

donde

$$(2) \quad \left(\frac{\Delta k}{k_F}\right) = \frac{k_{\infty} \text{ (sin barra absorbadora)} - k_{\infty} \text{ (con barra absorbadora)}}{k_{\infty} \text{ (sin barra absorbadora)}}$$

y

$$(3) \quad \Omega = \frac{I \theta}{2} \left\{ \frac{rG}{\sum a} \right\}$$

635.-

donde

k_{∞} = constante de multiplicación de neutrones en un sistema infinito

θ = número de barras veneno (o de gran sección de absorción) por unidad de superficie del haz (barras/cm²)

640.-

r = radio de absorbedor efectivo dependiente del tiempo (cm)

G = factor de depresión del flujo térmico dependiente del tiempo (no dimensional) (véase ecuación (5))

$\sum a$ = sección transversal de absorción térmica promediada por celda del combustible sin barra de absorbedor (cm⁻¹)

645.-

Como primera aproximación, el radio de absorbedor puede relacionarse con la exposición del combustible por la expresión lineal:

$$(4) \quad r = r_0 (1 - E/E_B)$$

donde

650.-

r_0 = radio de absorbedor inicial (cm)

E = exposición (MWD/T)

E_B = exposición a la cual el efecto del absorbedor desaparece (MWD/T)

655.-

El factor de depresión del flujo (G) depende del radio del absorbedor, del coeficiente de difusión del combustible y de la longitud de difusión térmica. En primera aproximación, la variación de (G) depende solamente del radio del absorbedor y puede tomarse como:



335669

660.-

(5)

$$G = \frac{1 + br}{1 + ar}$$

donde r es el radio de absorbedor (cm) y las constantes (a) y (b) dependen del estado del reactor y, para un reactor típico de agua hirviente, a = 4, 1, 3,1 y 3,2 y b = 2,0, 1,7 y 2,0 para estados frío, caliente de reserva o espera y caliente de funcionamiento, respectivamente. Estos factores variarán de manera conocida con diferentes parámetros del núcleo y en diferentes tipos de reactores.

665.-

670.-

La variación de la concentración de átomos del absorbedor en la barra de absorbedor (átomos de absorbedor por centímetro cúbico) dá como resultado la variación de la exposición del haz combustible requerida para que desaparezca la capacidad de control del sistema de mando fijo. La expresión analítica relativa a la densidad de átomos inicial aproximada del absorbedor requerida para conseguir la exposición de com-

675.-

bustión deseada es:

$$(6) P = \frac{KE_B}{4} \frac{ar_0}{b} + \frac{a-b}{b^2} \lambda n \left(\frac{1}{1 + br_0} \right)$$

donde

680.-

$$K = \frac{1}{\sigma_{25} E_B} \lambda n \left(\frac{AF_0}{AF_B} \right) \left(\frac{1}{\text{barn MWD/T}} \right)$$

y

σ_{25} = sección transversal de absorción microscópica media en el tiempo de U^{235} representativa del espectro de combustible (barns)

685.-

E_B = exposición de combustible aproximada o calculada en la región del núcleo en torno de la situación del combustible de recarga, de la exposición de agotamiento deseada (MWD/T)

AF_0 = fracción atómica inicial del U^{235}

690.-

AF_B = fracción atómica del U^{235} a exposición E_B

335669



La fuerza de control de la barra de mando separable (situada junto al haz de combustible) se denomina $(\frac{\Delta k}{k_M})$ y puede venir dada por la expresión:

695.- (7)
$$\left(\frac{\Delta k}{k_M}\right) = \frac{k_{\infty}^{uc} \text{ (barra de mando fuera)} - K_{\infty}^c \text{ (barra de mando dentro)}}{k_{\infty}^{uc} \text{ (barra de mando fuera)}}$$

donde k_{∞}^{uc} y k_{∞}^c son las constantes de multiplicación de neutrones en un sistema infinito cuando las barras de mando están, respectivamente, totalmente retiradas y totalmente insertadas. En ambos casos, k_{∞}^{uc} y k_{∞}^c el sistema de mando fijo, cuando se use, se considera colocado en el sistema.

700.-

La reactividad del haz combustible y la fuerza de la barra de mando son influenciadas por la situación de la barra separable que contiene absorbedor dentro del haz de combustible. Esto es así porque una barra con absorbedor dada capturaré más neutrones en regiones que tengan un gran flujo neutrónico que en regiones que lo tengan bajo. Los flujos neutrónicos mayores ocurren en general en y cerca de las regiones de moderador-agua debido a la mayor termalización en estas regiones de absorción de neutrones relativamente baja. La curva I de la figura 10 muestra la distribución del flujo neutrónico del haz de combustible a lo largo de la diagonal 68 cuando no hay insertadas en el haz barras de absorbedor. Por la curva I puede verse que el flujo neutrónico es relativamente grande en las regiones de agua-moderador ancha (W) y estrecha (N) y es relativamente bajo dentro del haz, donde pasa por un mínimo aproximadamente en la región central. La figura 10 muestra también otras diversas curvas que explicaremos en lo que sigue. Esta figura muestra el flujo neutrónico a lo largo de la diagonal 68 en función de la distancia.

705.-

710.-

715.-

720.-



335669

725.- Por la curva I de la figura 11 puede verse que la reactividad incontrolada del haz será mínima cuando la barra de absorbedor está situada en la posición A (véase la figura 3) y aumentará progresivamente a medida que la misma barra es llevada sucesivamente a las posiciones B, C, D y luego disminuirá gradualmente mientras es movida a las posiciones E y F. Recíprocamente, la fuerza del sistema de control fijo (curva II) disminuye inicialmente y luego aumenta a medida que la barra de absorbedor es movida sucesivamente a las posiciones A a F. Estas curvas ilustran el efecto de una sola barra de absorbedor y pueden ampliarse fácilmente para incluir una familia de curvas que muestren el efecto de barras de absorbedor múltiples a lo largo de la diagonal (puntos A a F) así como en otras posiciones simétricas con respecto a esta diagonal, tal como los puntos G y H. La figura 11 muestra la $(\frac{\Delta k}{k})_F$ en función de la posición de la barra de absorbedor.

740.- La figura 12 es una familia de curvas que ilustran el efecto de las variaciones del radio exterior del material de absorbedor y de las concentraciones del material de absorbedor. La familia de curvas asociada con un pequeño radio del absorbedor (r_{01}) tiene una menor fuerza del sistema de control fijo $(\Delta k/k)_F$ que la familia de curvas asociada a un radio mayor del absorbedor (r_{02}). Además, un aumento en la densidad de los átomos combustibles del absorbedor aumenta la exposición de agotamiento (E_B). Esto viene indicado en la figura 12 respectivamente por la familia de curvas P_{11} , P_{21} y P_{31} (asociadas con el radio r_{01}) y P_{12} , P_{22} y P_{32} (asociadas con el radio r_{02}). Por ello puede verse que la fuerza del sistema de control fijo combustible puede predeter-

750.-



minarse por la selección apropiada del radio efectivo o del diámetro del material absorbedor combustible. Las variaciones en la densidad del absorbedor combustible darán variaciones correspondientes en la duración del efecto de control fijo. En esta figura 12 la absorción es (E_B) MWD/T y la ordenada es $(\frac{\Delta k}{k})_F$.

La fuerza de la barra de mando movable $(\Delta k/k)_M$ puede variarse también en función de la posición de la barra de absorbedor en el haz de combustible. El posicionamiento de la barra de absorbedor a lo largo de la diagonal efectuará una importante redistribución del flujo de neutrones térmicos a través del haz de combustible. Así, el flujo de neutrones en la región de la barra de mando puede ser alterado. La fuerza de una barra de mando es directamente proporcional al flujo de neutrones en el área circundante.

Se ha visto que la intensidad de reactividad de la barra de mando junto al haz aumenta progresivamente a medida que una barra determinada es movida progresivamente desde la posición A a la F (véase la figura 3) como ilustra la curva I de la figura 13, que indica en abscisas la posición de la barra de absorbedor y en ordenadas, $(\frac{\Delta k}{k})_M$. Esto no podía anticiparse originariamente ya que la curva I de la figura 11 muestra que la reactividad (k_{∞}^{uc}) del haz aumenta progresivamente y luego disminuye a medida que la barra de absorbedor es movida a lo largo de la diagonal. Por consiguiente, era de esperar que esta misma curva general caracterizara la intensidad o fuerza de la barra de mando como se indica en la curva II de la figura 13. El aumento continuo de la curva I de la figura 13, y no el aumento inicial y luego la disminución de la curva II de la figura 13, se cree que es debido a un efecto "de

335669



785.- inclinación o vuelco" del flujo neutrónico en el haz de combustible en torno al centro de la diagonal a medida que la barra de absorbedor es movida a los puntos D, E y F. Este efecto de inclinación viene ilustrado por las dos familias de curvas mostradas en la figura 10. La primera familia de curvas (curvas I, II y III) representa la distribución del flujo neutrónico cuando se retira totalmente la barra de mando móvil. La segunda familia de curvas (curvas IV, V y VI) representa la distribución del flujo neutrónico cuando se inserta plenamente la barra de mando móvil. La curva VII representa el valor del flujo neutrónico alrededor del cual están normalizadas las curvas I a VI.

795.- Con referencia a la primera familia de curvas, la curva I representa la distribución del flujo a través del haz (a lo largo de la diagonal 68) cuando no hay insertadas barras de absorbedor en el haz y la barra de mando está fuera. La curva II representa la distribución del flujo (barra de mando fuera) cuando una sola barra de absorbedor está situada en la posición A y la curva III representa la distribución del flujo (barra de mando fuera) cuando una sola barra de absorbedor está situada en la posición F. En gracia a la claridad, no se muestra la familia completa de curvas (es decir, con la barra de absorbedor en las posiciones B, C, D, E, G y H); sin embargo, se apreciará que estarán situadas proporcionalmente entre las curvas II y III. Por ejemplo, una barra de absorbedor situada en la posición B causaría una distribución del flujo neutrónico que estaría representada por una curva entre las curvas I y II y una barra de absorbedor situada en la posición E estaría representada por una curva entre las curvas I y III. Por la curva II (barra de absorbe-

800.-

805.-

810.-



- dor en A) puede verse que el flujo neutrónico en la región de la barra de mando disminuye sustancialmente reduciendo así la fuerza de la barra de mando. A la inversa, como se ilustra por la curva III, se ha visto que la fuerza de la barra de mando aumenta situando la barra de absorbedor en la posición F. Esto es así porque la distribución del flujo de neutrones se "inclina" aparentemente en torno al centro del haz de combustible como se muestra mediante esta familia de curvas.
- 815.-
- 820.- Con referencia a la segunda familia de curvas (curvas IV, V y VI), puede verse que la distribución del flujo cuando la barra móvil de mando está dentro es mucho menor junto a la barra de mando que cuando la barra de mando está fuera. La variación en esta familia de curvas en función de la variación de la posición de la barra separable de absorbedor es similar a la de la primera familia de curvas. Será evidente también que pueden dibujarse otras curvas que ilustren la distribución del flujo cuando está insertada más de una barra de absorbedor en el haz de combustible. Con barras de absorbedor
- 825.-
- 830.- situadas en las posiciones D, E y F, el flujo neutrónico resultante en la región adyacente a la barra de mando es mayor que el que habría de esperarse normalmente. Por consiguiente, se ha visto que es posible aumentar la fuerza de la barra de mando por el uso de barras de absorbedor situadas en estas posiciones.
- 835.-
- De lo que antecede puede verse que el haz de combustible tiene la capacidad de modificar las características nucleares del núcleo del reactor en una pluralidad de formas diferentes. Los cambios básicos en las características del reactor que pueden hacerse con el haz de combustible son las siguientes:
- 840.-



335669

- (1) Reducción de la multiplicación de neutrones infinita incontrolada (k_{∞}^{uc}).
- (2) Aumento de la fuerza del sistema móvil de mando ($\frac{\Delta k}{k_M}$)
- (3) Disminución de la fuerza del sistema móvil de mando ($\frac{\Delta k}{k_M}$).
- 845.- (4) Aumento de la multiplicación de neutrones infinita incontrolada (k_{∞}^{uc}).
- (5) Variación de la longitud del ciclo del reactor.

850.- Los ejemplos siguientes describen las diversas situaciones que pueden requerir el uso de una o más de las características arriba descritas del haz de combustible de este invento.

Ejemplo 1.-

855.- Reducción de la multiplicación de neutrones infinita incontrolada (k_{∞}^{uc}).

860.- En ciertas situaciones puede ser deseable reducir la (k_{∞}^{uc}) del combustible de recarga. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando resulte necesario parar la instalación antes de la parada programada. Existen muchas circunstancias diferentes que pueden exigir esta parada prematura, tales como un fallo de la turbina o del generador. Como resultado de esta parada prematura, el combustible irradiado no tendrá exposición suficiente acumulada para permitir el uso efectivo del combustible de recarga que fué proyectado muchos meses de antemano de la nueva carga programada. Es decir, la reactividad (k_{∞}^{uc}) del combustible expuesto en el núcleo no se habrá empobrecido o disminuído en medida suficiente para acomodar el combustible de recarga, cuyo enriquecimiento y reactividad habían sido elegidos sobre la base de una reactividad menor supuesta en el núcleo. Como resultado de ello, no podrá satisfacerse el margen de parada del reactor después de la adición del com-

870.-

335669



bustible de recarga, ya que el factor de multiplicación de neutrones infinita incontrolada (k_{∞}^{uc}) del núcleo repuesto de combustible sería demasiado grande para modificar el combustible de recarga. Para hacer frente a esta situación, pueden

875.- insertarse dos barras de combustible con absorbedor en cualquiera de las posiciones GH como se ha ilustrado en la figura 14A o insertarse en las posiciones C o D como se ilustra en la figura 14B. Por la figura 13 puede verse que la reducción resultante en (k_{∞}^{uc}) puede lograrse con poco efecto sobre la fuerza del sistema movable de barras de mando. Es decir, la adición de absorbedor combustible en los puntos G y H tienen aproximadamente el mismo efecto que el de añadir absorbedor combustible en el punto G, H a lo largo de la curva I de la figura 13 y, por tanto, no variará apreciablemente la

880.- fuerza de las barras de mando movibles como resultado de la acción de inclinación del flujo neutrónico descrito en relación con la figura 13. La adición de barras de absorbedor de los puntos C y D tiende a anular el efecto de inclinación que de otro modo resultaría si sólo se colocara una barra de absorbedor en C o en D. Por las curvas I y III de la figura 11 puede verse que la reactividad del haz (k_{∞}^{uc}) disminuirá algo por la adición de estas barras de absorbedor (C y D o G y H) y puede haber una pequeña disminución asimismo en la fuerza

890.- de las barras de mando móviles. Debe señalarse que esta disminución en la fuerza de las barras de mando podría eliminarse por la adición de una barra de absorbedor (con un radio apropiadamente elegido) en el punto E consiguiendo de este modo la fuerza original de las barras de mando. Es decir, el haz tendría una menor reactividad, pero la acción de inclinación de la barra de absorbedor en el punto E devolvería la

895.-

900.-

335669



fuerza original de las barras de mando. Debe señalarse también en este momento que puede usarse una reducción sustancial en el k_{co}^{uc} del sistema para disminuir la fuerza de la barra de mando individual, lo cual discutiremos luego en el ejemplo 3.

905.- Dependiendo del resultado deseado ha de entenderse que sólo puede usarse una barra de absorbedor en una de las posiciones antes mencionadas.

Ejemplo 2.-

Aumento de la fuerza del sistema de mando móvil $\left(\frac{\Delta k}{k_M}\right)$

- 910.- Si se produce una parada excepcionalmente prematura que deja al núcleo con un gran margen excesivo de reactividad sobre y por encima del supuesto para el núcleo en la fecha propuesta para la parada y no existen dificultades en una fuerza excesiva de las barras de mando individuales, puede ser deseable reducir el k_{co}^{uc} del combustible y aumentar simultáneamente la fuerza de las barras de mando. Esto puede lograrse colocando la barra de absorbedor en la posición F como se ilustra, en la figura 15. Por la curva I de la figura 13, puede verse que la fuerza de las barras de mando aumenta sustancialmente, y
- 915.- por la curva I de la figura 11, puede verse que la reactividad del haz combustible ha sido disminuída. Por el análisis que antecede, con respecto a la figura 10, se apreciará que pueden colocarse una o más barras de absorbedor en las posiciones D, E y F, dependiendo del grado deseado de aumento en la fuerza de las barras de mando o de disminución en el k_{co}^{uc} del combustible. Sin embargo debe cuidarse al hacer esta modificación de asegurar que se mantiene el margen de parada adecuado a medida que progresa el ciclo de exposición del combustible. Es concebible que el rápido agotamiento del absorbedor
- 920.- combustible en la barra separable podría conducir a un haz de
- 925.-
- 930.-



combustible o núcleo con reactividad excesiva y que no podría mantenerse el margen de parada.

Ejemplo 3.-

Disminución de la fuerza del sistema de mando móvil $\left(\frac{\Delta k}{k_M}\right)$

- 935.- Con el fin de proporcionar distribuciones radiales más suaves de la energía y de dar una respuesta más exacta en los instrumentos respecto al flujo neutrónico en el núcleo, puede ser deseable reducir la fuerza global del sistema de mando móvil del reactor. Además, puede ser deseable reducir
- 940.- la fuerza de las barras de mando en una zona localizada del núcleo. Las reducciones global (sistema de mando móvil) y localizada (barra de mando móvil) en la fuerza, se consiguen fácilmente mediante el haz de combustible de este invento. Esto puede lograrse colocando una o más barras de absorbedor
- 945.- en las posiciones A, B ó C de la figura 3. Por ejemplo, si las barras de absorbedor son situadas en las posiciones A, B y C como se indica en la figura 16, puede verse por la curva I de la figura 11 que la k_{eff}^{UC} global del combustible se reduce y por la curva I de la figura 13, puede verse que
- 950.- también se reduce la fuerza de la barra de mando. El grado de reducción en la fuerza del sistema de mando viene determinado por el número de haces en que se colocan barras de absorbedor y por el número y la posición de las barras de absorbedor en cada haz. La fuerza localizada de la barra de
- 955.- mando viene determinada por el número y la posición de barras de absorbedor en ese haz particular.

En el ejemplo dado en la figura 16, las barras de absorbedor están situadas en las posiciones A, B y C. Para una fuerza dada del sistema de mando fijo esto proporcionará

- 960.- una máxima reducción en la fuerza de la barra de mando móvil



así como en la fuerza total del sistema de mando móvil. Esto puede verse por la curva I de la figura 13 que muestra que las barras de absorbedor situadas en los puntos C, B y A dan como resultado reducciones progresivamente mayores en la fuerza de la barra de mando móvil. La reducción total en la fuerza de la barra de mando móvil es menor que la suma de las tres reducciones debidas a las barras de absorbedor en las posiciones A, B y C. Sin embargo, la reducción total será mayor que cualquiera de las barras individualmente. Si se requiere una menor reducción en la fuerza de la barra de mando móvil, puede insertarse un menor número de barras de absorbedor, por ejemplo en las posiciones A, B ó C o en cualquier combinación de ellas. Si se requiere una mayor reducción en la fuerza de la barra de mando, puede aumentarse el radio de absorbedor de las barras de absorbedor.

Ejemplo 4.-

Aumento de la multiplicación de neutrones infinita incontrolada (k_{∞}^{uc})

En ciertas circunstancias puede ser deseable aumentar la k_{∞}^{uc} del combustible expuesto que está cargado en el núcleo. Esto podría ocurrir si la parada programada de la central nuclear debe aplazarse y debe prolongarse el funcionamiento, debido a la parada no programada de otra central de la red. En estas condiciones, los haces de combustible de recarga (fabricados muchos meses de antemano) no tendrán reactividad suficiente para excitar el núcleo a valores de energía de funcionamiento normales hasta la nueva parada programada. Puede no resultar factible en ese momento descargar una mayor fracción del combustible parcialmente expuesto y sustituirlo por nuevo combustible de recarga. En esta situación, pueden



insertarse barras separables con mayor reactividad (es decir, con menos absorbedor o con mayor enriquecimiento, o ambas) en una o más de las posiciones A, B, C, D, E, F, G o H, como se ha indicado en las figuras 3 y 17. El ajuste apropiado de la reactividad por la adición de una barra de absorbedor, por ejemplo en la posición B, puede hacerse para conservar el valor de la barra de control original. Esto puede ser necesario, por ejemplo, para mantener un margen de parada apropiado. Además, el combustible irradiado que no fué sustituido por el combustible de recarga podría ver aumentada su reactividad por la adición de barras de combustible enriquecido separables en una o más de las posiciones A, B, C, D, E, F, G o H.

995.-

1.000.-

Ejemplo 5.-

Variación de la duración del ciclo del reactor

1.005.-

A causa de cambios en el programa de trabajo, el operador del reactor pudiera desear acortar o alargar el tiempo del ciclo de combustible entre paradas para reponerlo. Estos cambios en el programa de parada para la reposición del combustible podrían deberse a cambios inesperados en el factor de capacidad que provocaran la parada en momentos indeseables del año. Tal cambio en el ciclo de combustible podría requerir un aumento o una disminución en el número de haces de combustible cargados en el reactor. Si ha de aumentarse el ciclo, debe reducirse el k^{uc} de un nuevo combustible más reactivo, como en el ejemplo 1, para dar satisfacción a las exigencias de la parada. Además, para aumentar o para disminuir el número de haces de recarga debe alterarse la densidad atómica del absorbedor de la barra separable para que sea compatible con la duración del ciclo. O bien el absorbedor no debe agotarse con demasiada rapidez, o debe estar agotado para

1.010.-

1.015.-

1.020.-



el final del ciclo, dependiendo de si se desea una reducción o, respectivamente, un aumento del ciclo. El haz de combustible de este invento permite el cambio de barras de absorbedor con cualquier concentración atómica deseada del absorbedor para acomodarse a tales pequeños cambios de última hora en el programa.

En vista de los ejemplos que anteceden y de la descripción del presente invento, puede verse que el haz de combustible del presente invento hace posible ajustar un haz de combustible para que satisfaga las necesidades inmediatas de un reactor. Esto puede realizarse sobre el combustible de recarga o sobre el combustible irradiado del reactor, no programado para sustitución, como en el ejemplo 5. Ha de entenderse que el haz de combustible no queda limitado a las situaciones arriba descritas ya que existen muchas otras en las que también podrían aplicarse.

En lo que antecede sólo se ha mostrado una ilustración específica para retirar, insertar y bloquear la barra de combustible separable y ha de entenderse que ésta era sólo una realización preferida y que podrían hacerse otras muchas disposiciones adecuadas. Ha de entenderse también que el presente invento no queda limitado a un grupo cuadrado de 6 x 6, sino que también podrían usarse en grupos cuadrados mayores o menores, en los cuales las aberturas para barras separables podrían disponerse en general a lo largo de la diagonal así como en posiciones simétricas a esta línea. Además, en ciertas situaciones puede ser deseable incluir menos posiciones de barras separables a lo largo de esta línea o en posiciones simétricas distintas de las antes descritas. Como se ha hecho notar antes, el invento es aplicable a otros haces de combus-



tible que no sean cuadrados, en los cuales las líneas de posiciones de las barras separables puedan no estar constituidas literalmente por una diagonal.

- Ha de entenderse que los materiales absorbedores que
- 1.055.- pueden usarse en las barras separables del presente invento incluyen los siguientes, pero sin limitarse a ellos: Gadolinio, európio, erbio, disprosio, samario, boro, torio, Pu²⁴⁰, U²³⁸, etc. Se ha encontrado que el gadolinio es un absorbedor combustible particularmente eficaz a causa de su sección transversal muy grande de captura de neutrones térmicos lo que da como resultado elevadas características de auto-protección. A causa de esta característica de auto-protección, el agotamiento de los isótopos del gadolinio en una geometría cilíndrica da un agotamiento lineal de la fuerza del absorbedor del sistema fijo con la exposición. El agotamiento lineal de la fuerza del sistema de mando fijo es deseable desde el punto de vista del funcionamiento del reactor, ya que la reactividad del combustible disminuye linealmente con la exposición. Por consiguiente, estas dos relaciones lineales pueden hacerse iguales, dando así como resultado una reactividad constante del haz de combustible con la exposición. Además, puede ser deseable incorporar material escindible o material fértil, o ambos, en la barra separable.
- 1.060.-
- 1.065.-
- 1.070.-

N O T A.-

- 1.075.- 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:
- 1º.- Una disposición de conjunto de combustible para reactor nuclear, que comprende una pluralidad de barras, pri-



- 1.080.- meros medios situados en un extremo de dicho conjunto o haz de combustible y conectados operativamente con los extremos de dicha pluralidad de barras, segundos medios situados en el otro extremo de dicho conjunto o haz y conectados operativamente con los otros extremos de dicha pluralidad de barras,
- 1.085.- conectando operativamente dichos primeros medios y dichos segundos medios dicha pluralidad de barras en una disposición geoméricamente predeterminada, caracterizada porque dicha pluralidad de barras incluye al menos una barra separable situada sustancialmente a lo largo de una línea de posiciones de barra que se extiende desde una primera posición en dicha disposición geométrica a una segunda posición en dicha disposición geométrica, incluyendo dichos primeros medios, medios que forman al menos una abertura sustancialmente a lo largo de dicha línea en dichos primeros medios para retirar
- 1.090.- o insertar dicha, al menos, barra separable única sin desconectar las barras restantes de dicha disposición geométrica predeterminada, conteniendo dicha, al menos, barra separable única, material especial absorbedor que tiene una gran sección transversal de captura sin escisión y estando situada en esencia en un punto a lo largo de dicha línea de posiciones de barra entre, sustancialmente, la posición central de dicha línea y dicha segunda posición, estando dicha segunda posición de dicho haz combustible en un punto de dicho haz combustible alejado del eje geométrico longitudinal de dicha barra de mando para dar una fuerza incrementada de barra de mando cuando dicho haz combustible está insertado en dicho reactor nuclear.
- 1.105.-

2^a.- Una disposición según el punto 1^a, caracterizada porque dichos medios que forman una abertura incluyen una ranura junto a dicha abertura que se extiende en todo el espe-



1.110.- sor de dichos medios primeramente citados, incluyendo dicha barra separable un mecanismo de bloqueo que coopera con dicha abertura y dicha ranura de dichos primeros medios citados para retener dicha barra separable en una posición fija.

3^a.- Una disposición según el punto 1^a, en la cual dichos medios formadores de abertura comprenden un miembro cilíndrico alargado que incluye dicha ranura e incluye una entalladura dispuesta en un ángulo fijo desde dicha ranura, extendiéndose dicha entalladura parcialmente a través del espesor de dicha primera placa-tirante con lo cual dicho mecanismo de

1.115.- bloqueo es encajado en dicha entalladura cuando dicho mecanismo de bloqueo está en la posición bloqueada.

4^a.- Una disposición según el punto 1^a, en la cual dicha pluralidad de barras incluye al menos dos barras separables situadas en esencia simétricamente a lados opuestos de dicha línea de porciones de barra, y medios que forman al menos dos aberturas en dichos primeros medios para separar o insertar respectivamente dichas, al menos, dos barras separables.

5^a.- Una disposición según el punto 1^a, caracterizada porque dicha, al menos, única barra separable contiene material escindible de la clase consistente en un combustible con material escindible que tiene concentraciones atómicas iguales al resto de dicha pluralidad de barras, un combustible con material escindible que tiene concentraciones atómicas diferentes del resto de dicha pluralidad de barras, un mate-

1.120.- rial combustible mezclado con un absorbedor especial de neutrones, un material inerte mezclado con un absorbedor especial de neutrones y un absorbedor especial de neutrones sin adiciones.

6^a.- Una disposición según el punto 4^a, caracterizada

335669



1.140.- porque una o más barras separables pueden estar situadas selectivamente en una o más de dichas posiciones de barra para variar la fuerza de la barra de mando o para variar la reactividad del haz, o para ambas cosas.

7º.- Una disposición según el punto 4º, caracterizada
1.145.- porque al menos una barra de absorbedor especial está situada en esencia en el centro de dicho haz combustible para proporcionar una disminución de la reactividad del haz.

8º.- Una disposición según el punto 4º, caracterizada.
1.150.- porque al menos una barra combustible está situada en esencia en el centro de dicho haz combustible para aumentar la reactividad del haz combustible.

9º.- "UNA DISPOSICION DE CONJUNTO DE COMBUSTIBLE PARA REACTOR NUCLEAR", todo tal y conforme se describe en la presente memoria, la cual consta de 1.155 líneas y a título de
1.155.- ejemplo se representa en los adjuntos dibujos.

Madrid, 14 ENE. 1967

ESCALA VARIABLE.

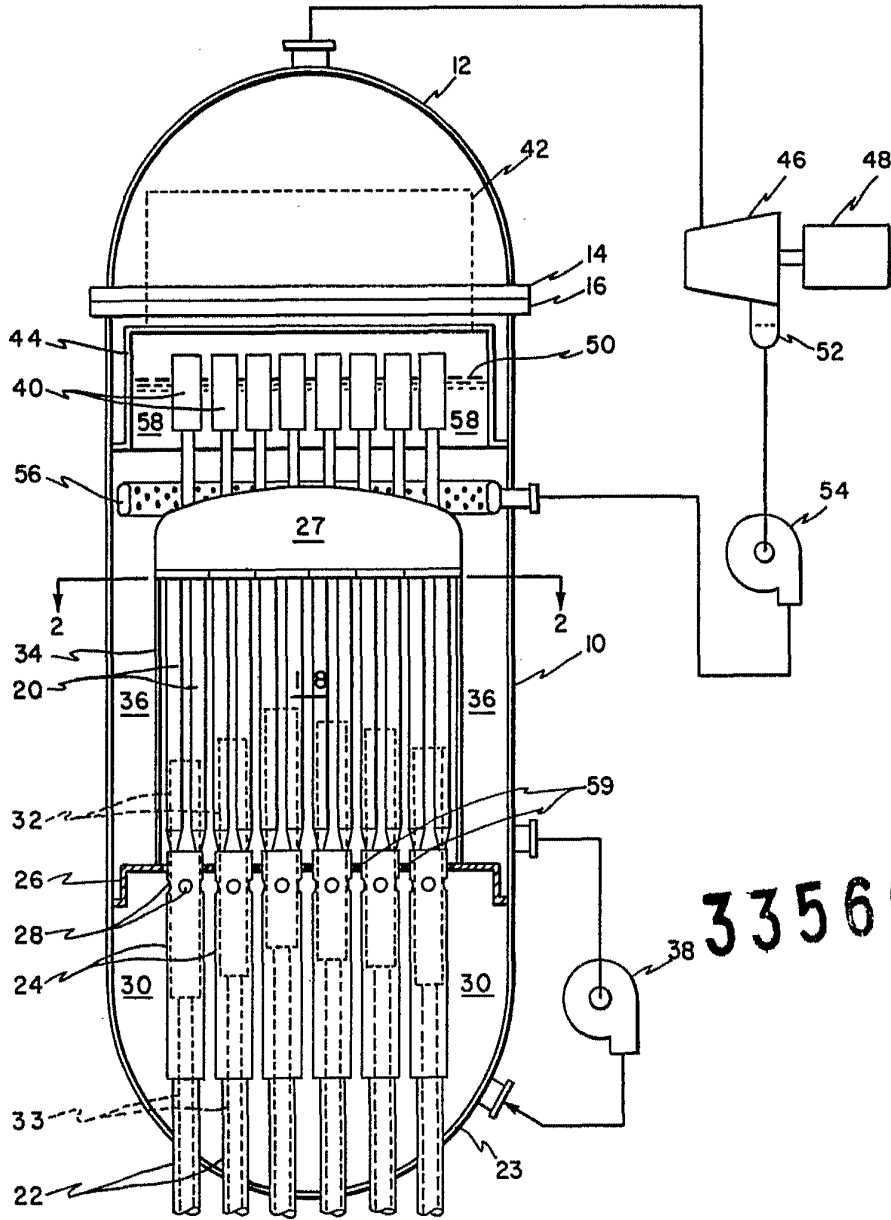


Fig 1

335669

Madrid, 14 ENE. 1967

A large, stylized handwritten signature or scribble in black ink, located in the bottom right corner of the page. It appears to be a cursive signature, possibly of the inventor or a representative of the company.

ESCALA VARIABLE.

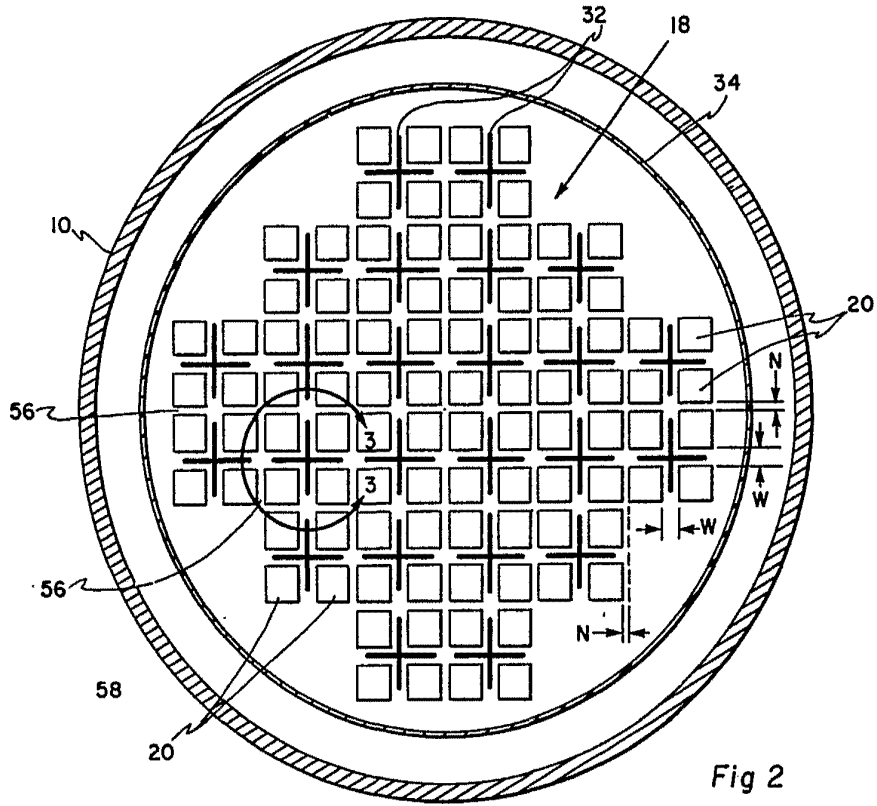


Fig 2

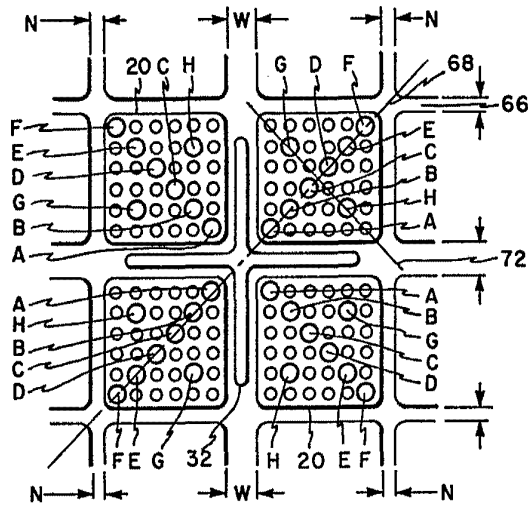


Fig 3

335669

Madrid, 14 ENE. 1967

ESCALA VARIABLE.

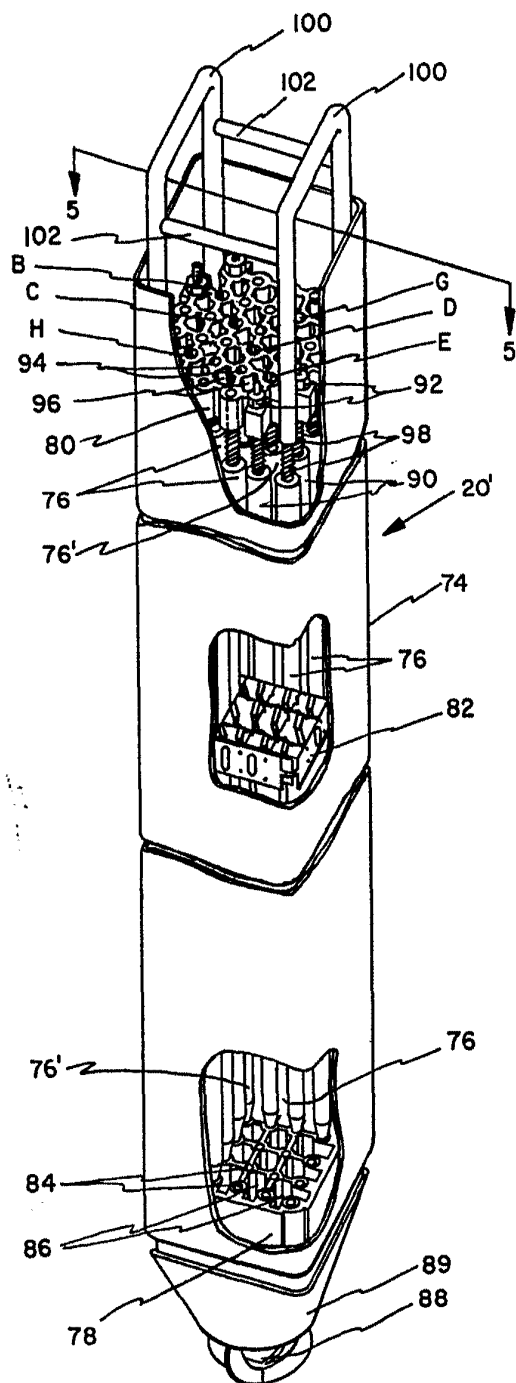


Fig. 4.

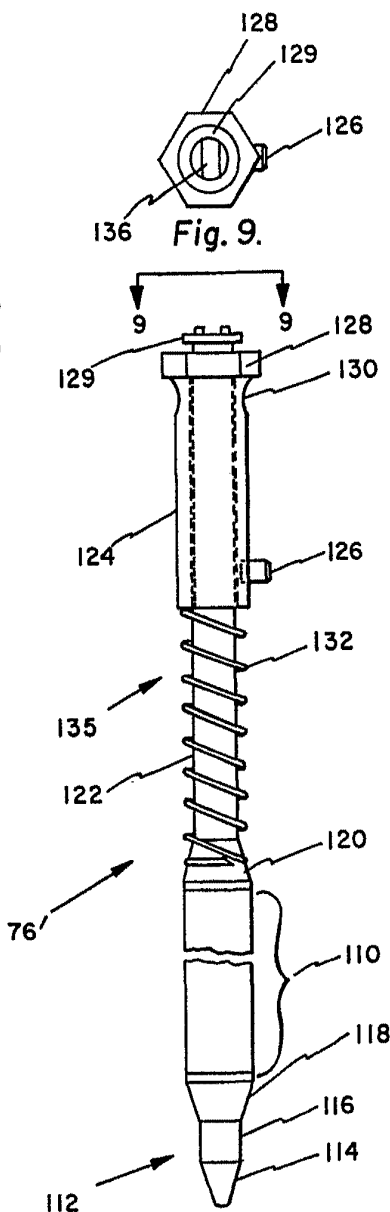


Fig. 8.

Fig. 9.

335669

Madrid, 14 ENE. 1867

[Handwritten signature]

ESCALA VARIABLE.

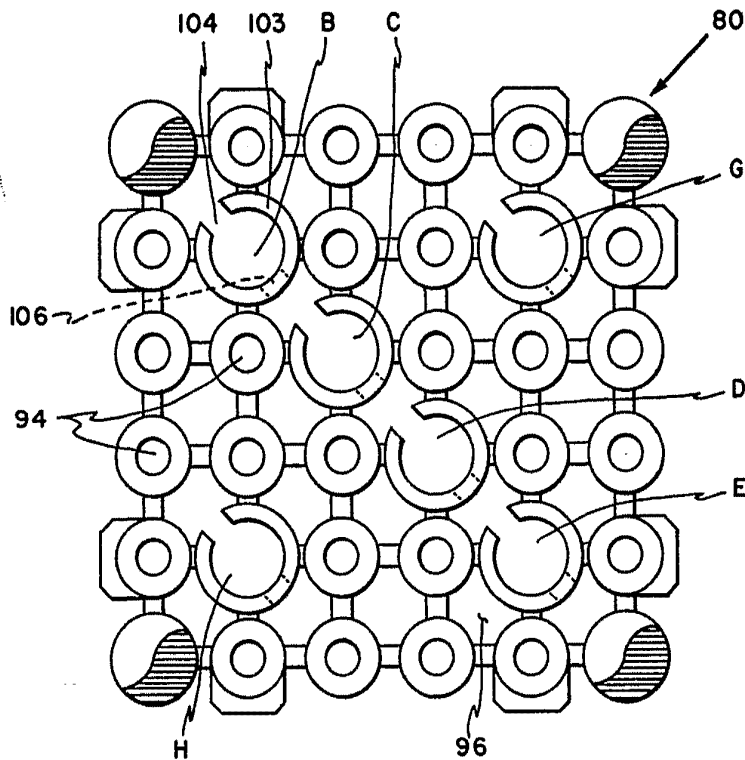


Fig 5

335669

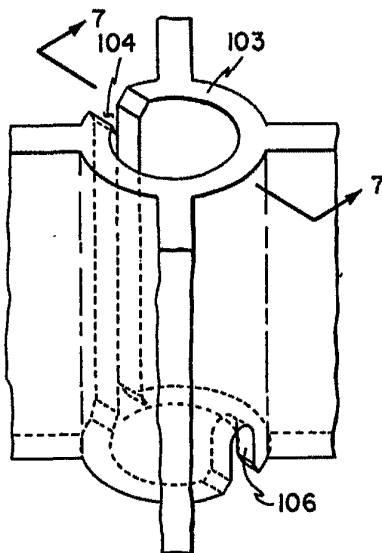


Fig 6

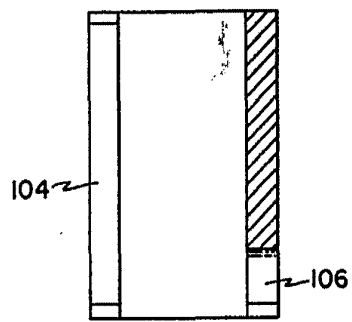
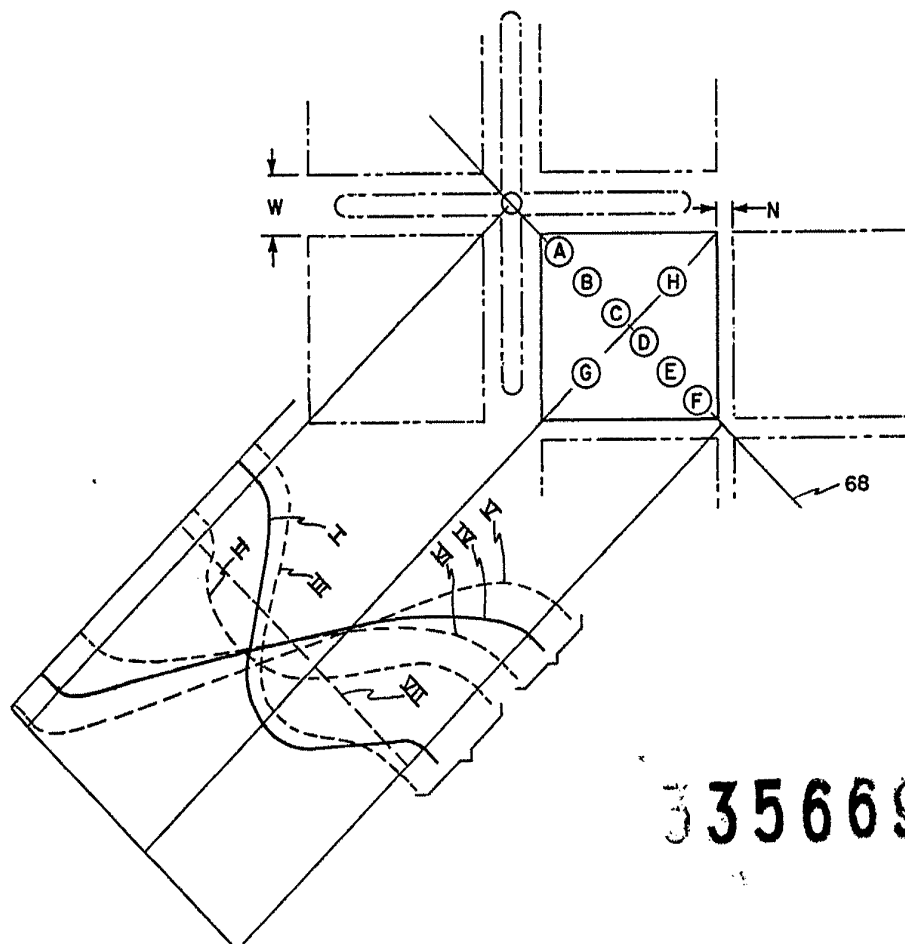


Fig 7

Madrid, 14 ENE. 1967

ESCALA VARIABLE.



335669

Fig 10

Madrid, 14 ENE. 1967

ESCALA VARIABLE.

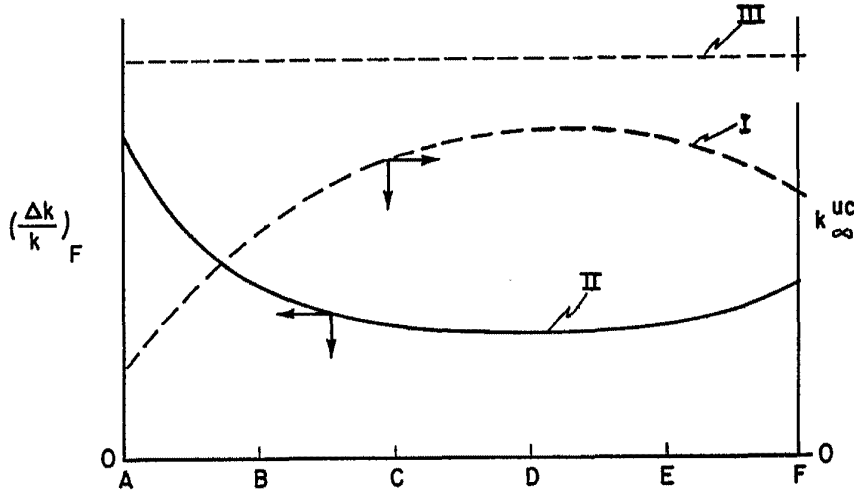
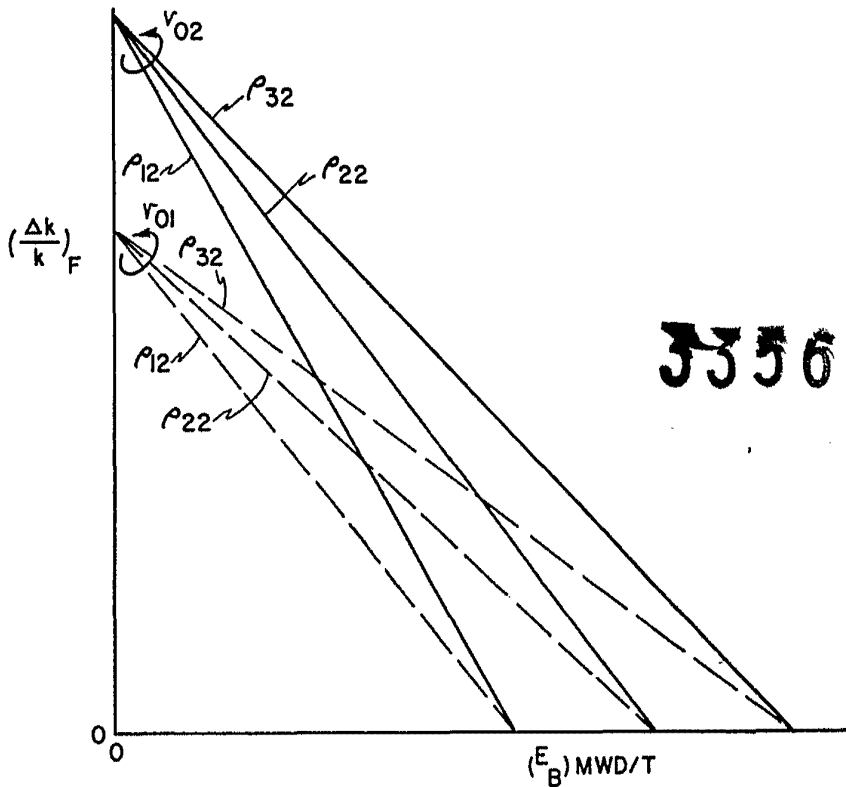


Fig 11



335669

Fig 12

Madrid, 4 ENE. 1967

ESCALA VARIABLE.

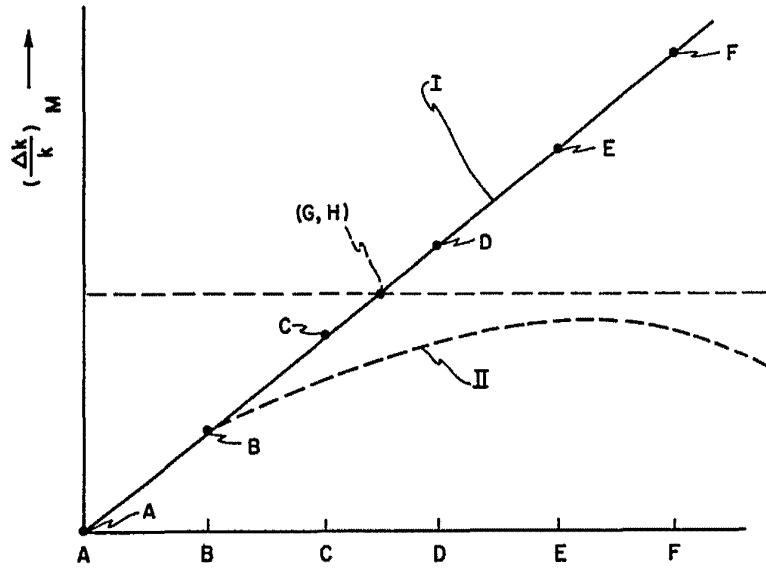


Fig 13

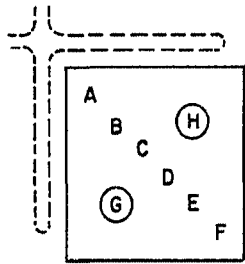


Fig 14A

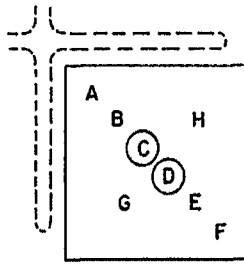


Fig 14B

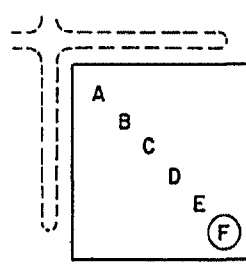


Fig 15

335669

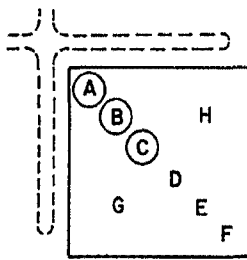


Fig 16

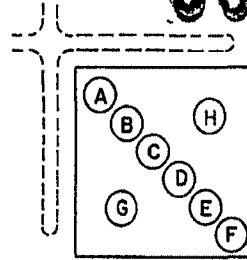


Fig 17

Madrid, 14 ENE. 1967