



314669

PATENTE DE INVENCION

M E M O R I A D E S C R I P T I V A

S o b r e :

" REACTOR NUCLEAR DE VIDA LARGA DE SEMILLA Y MANTO "

- - - - -

Solicitante: UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION, entidad
estadounidense, domiciliada en GERMANTOWN, MA-
RYLAND, U. S. A.

- - - - -

Inventor: Don George H. CONLEY.

- - - - -



La presente invención concierne a las construcciones de reactores nucleares heterogéneos, y más particularmente, a disposiciones de reactores nucleares que pueden rendir grandes cantidades predeterminadas de energía

5. durante largos períodos de vida sin necesidad de reponer el combustible.

En sus más específicos aspectos, esta invención concierne a la construcción de núcleos de reactores nucleares heterogéneos del tipo de semilla-manto en los cuales

10. los combustibles fisibles y fértiles son segregados en el núcleo del reactor en una forma predeterminada, y en los que las concentraciones de materiales fisibles y fértiles están elegidas para producir una reacción controlada en cadena con un nivel de potencia predeterminado durante pe-

15. ríodos de vida sustancialmente extensos.

En el campo de reactores nucleares heterogéneos, un reactor del tipo semilla-manto ha sobresalido como reactor productor de potencia. En la Estación de Energía Atómica de Shippingport, Pennsylvania, se construyó el primer reactor

20. de la estación central, capaz de producir grandes cantidades de energía, con una semilla de uranio altamente enriquecido (U^{235}) y un manto de uranio natural (U^{238}). La parte de la semilla tenía, generalmente, configuración anular, y el manto de uranio natural comprendía un núcleo central y un anillo exterior rodeando la semilla.

25.

314669



25

- En la Estación de Energía Atómica de Shippingport, al igual que para cualquier reactor nuclear, la limitación de funcionamiento del reactor viene determinada por el exceso de reactividad del reactor en cualquier punto durante la
5. vida del núcleo del reactor. Más particularmente, el exceso de reactividad incorporada en el núcleo del reactor no puede exceder la capacidad de control del sistema de control del reactor. Así, una evidente limitación en cualquier reacción comprende la extensión del exceso de reactividad controlable por el sistema de control del reactor. Es de notar que los valores típicos de exceso de reactividad controlables con uno o más de los actuales métodos, son del orden de 0,10 a 0,30 ΔK_{eff} (exceso máximo de reactividad en funcionamiento equilibrado). En la Estación de Shippingport se
 10. determinó que el exceso máximo de reactividad durante la vida de una semilla, se producía al comienzo de su vida. El exceso de reactividad decrece monotonamente con la duración de la vida (es decir, a medida que aumenta la vida de la semilla, disminuye el exceso de reactividad). Como resultado,
 15. la vida útil de la semilla viene determinada, para el reactor de semilla-manto de Shippingport, por aquel período de vida en el cual el exceso de reactividad del núcleo del reactor se encuentra comprendido entre el máximo controlable (comienzo de la vida) y cero (final de la vida).
 - 20.
 25. El otro extremo de un reactor de potencia, de com-

314669



bustible mezclado, comprende lo que es conocido en la técnica como reactor "ligeramente enriquecido". Un reactor ligeramente enriquecido puede ser considerado con un reactor de semilla-manto con una semilla cuyo grosor es cero. Dicho en otras palabras, el reactor ligeramente enriquecido incluye una distribución uniforme de uranio enriquecido u otro combustible fisible (generalmente del 1 al 6% del combustible total) por todo el núcleo del reactor. El reactor ligeramente enriquecido muestra también su máximo exceso de reactividad en el comienzo de la vida, decreciendo monótonamente con éste.

En el reactor de semilla-manto de Shippingport, se utilizó una semilla anular relativamente gruesa, y el máximo exceso de reactividad se produjo al comienzo de la vida. En el reactor ligeramente enriquecido donde, efectivamente, se utiliza una semilla de grosor cero, el máximo exceso de reactividad se produce también en el comienzo de la vida. Así, el efecto de una construcción de un reactor que tenga su máximo exceso de reactividad al comienzo de la vida, se duplica para ambos casos: semilla gruesa y semilla de grosor cero.

De acuerdo con la invención, el valor de este exceso de reactividad, juntamente con la relación entre combustible fisible y fértil, la colocación del combustible y grosores de la semilla, son directamente determinan-

314669



23

- tes de la duración de vida útil del reactor. Al poner en práctica los principios de esta invención, se verá que es conveniente variar las cantidades antes citadas a ciertas condiciones óptimas, siendo el efecto de esta mejora la
5. obtención de un reactor operacional de larga vida útil. Por ejemplo, es conveniente tener una relación óptima entre combustible fisible y fértil; es necesario además, proveer una forma geométrica en la que resulte una relación óptima entre los núcleos fisibles de la semilla y
 10. los núcleos fértiles del manto, teniendo la semilla un grosor efectivo dentro de valores predeterminados. Siguiendo los principios de esta invención, el valor del control incorporado a este reactor para acomodar la máxima variación de reactividad, será reducido para cualquier carga
 15. inicial de material fisible. De esta forma, se permite una mayor carga inicial de material fisible para una variación dada de control. Para cualquier carga dada de material fisible, la vida útil del núcleo del reactor puede hacerse máxima siguiendo las enseñanzas de esta invención.
 20. De acuerdo con ésto, es uno de los objetos de la presente el elevar al máximo la energía obtenible de una carga dada de combustible fisible en un reactor de semillamanto.
 25. Otro objeto de esta invención es el de proveer un reactor neutrónico del tipo de semilla-manto que tiene

314669



el grosor de la semilla de un valor tal que proporcione una larga vida útil del núcleo del reactor.

Otro objeto de esta invención es la provisión de un nuevo y perfeccionado reactor neutrónico del tipo

5. de semilla-manto en el que los materiales combustibles fisible y fértil son elegidos y situados dentro del núcleo del reactor en una forma predeterminada para proporcionar una larga vida útil al núcleo.

Otro objeto de la invención es el proveer un

10. reactor neutrónico con una disposición capaz de acomodar una oscilación máxima predeterminada de la reactividad durante su vida, y en el que dicha disposición es seleccionada y repostada con material fisible y fértil para llevar al máximo la vida útil del núcleo del reactor.

Otro objeto más de la invención es el proveer

15. un reactor neutrónico del tipo de semilla-manto que tiene una extensa vida útil, y en el cual el máximo exceso de reactividad no tiene necesariamente que ocurrir al comienzo de la vida.

Otro objeto de esta invención es la provisión

20. de un nuevo y perfeccionado reactor de semilla-manto que contiene inicialmente material fisible y fértil, y en el que, sustancialmente, todo el material fisible está situado en la semilla del reactor y todo el material fértil está situado en el manto, y en el que la semilla del

25.

314000



reactor está formada con un grosor predeterminado y el núcleo tiene una relación predeterminada entre material de semilla y material de manto para producir un núcleo de reactor con una extensa vida útil.

5. De acuerdo con la invención, se entiende como material fisible un material que tiene grandes probabilidades de sufrir fisión al absorber un neutrón térmico y como material fértil un material que tiene grandes probabilidades de hacerse fisible como resultado de la absorción de un neutrón térmico.
- 10.

- En resumen, la invención consigue los objetos antes citados mediante la provisión de un reactor de semilla-manto en el que se obtiene una larga vida útil a través de una adecuada selección del grosor de la semilla, fracciones y composiciones de las masas del combustible fisible y fértil, y una apropiada disposición geométrica de dichos combustibles fisible y fértil para que el exceso de reactividad que se produce durante la vida útil del núcleo tenga una magnitud que sea controlable por uno o más de los métodos actuales de control. Ha sido determinado que, para un reactor de semilla-manto que tenga una relación dada entre el material fisible y fértil, hay un margen óptimo de grosores de semilla para cada relación de combustible fisible a fértil, que dá lugar a un reactor con un mínimo de exceso de reactividad, resultando, con
- 15.
- 20.
- 25.

314669



todo, una vida útil para el núcleo varias veces más larga que las vidas de los reactores actuales de los tipos de semilla-manto y de reactor ligeramente enriquecido.

Otros objetos y ventajas de esta invención se harán evidentes a medida que esta descripción progrese, y las características de novedad de la presente invención quedarán particularmente establecidas en las reivindicaciones anejas que forman parte de la presente especificación,

Para una mejor comprensión de la invención, puede hacerse referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

Las Figuras 1A, 1B y 1C comprenden cada una un juego de gráficos que ilustran el efecto del radio de la semilla y el efecto de la relación de combustible fisible a combustible total en un reactor neutrónico del tipo de semilla-manto sobre la vida útil, y la cantidad de control necesitada para tales reactores cuando usen el torio-232 como combustible de manto.

La Figura 2 es un gráfico en la que se resume la familia de gráficos de las Figuras 1A, 1B y 1C, mostrando los efectos de los cambios en la concentración de combustible y grosor de la semilla sobre el exceso máximo de reactividad, en un reactor de semilla-manto durante la vida útil de éste.

La Figura 3 es un gráfico mostrando los efectos

314669



259

de los cambios en la concentración del combustible y en el grosor de la semilla sobre el valor mínimo del exceso de la reactividad que se produce en un reactor de semilla-manto en las proximidades del comienzo de la vida del núcleo.

5. La Figura 4 es un gráfico que muestra la influencia del grosor de la semilla y de la relación entre el combustible fisible y el combustible total sobre el valor del control requerido por reactores de semilla-manto con mantos repostados con torio-232.

10. La Figura 5 incluye el gráfico de la Figura 4, con la superposición de las curvas de vida útil constante del núcleo de un reactor.

La Figura 6 es un gráfico similar al de la Figura 5, pero con el material del manto cargado con uranio natural.

15.

La Figura 7 es un gráfico similar al de la Figura 5, pero con el material del manto cargado con uranio agotado; y

Las Figuras 8, 9 y 10 secciones transversales esquemáticas de reactores de semilla-manto construidos de acuerdo con los principios de esta invención.

20.

DISPOSICIONES DEL COMBUSTIBLE

Al considerar la presente invención, es de notar que todos los materiales citados aquí se refieren a la construcción de reactores de semilla y manto en los que se han

25.—

34333



previsto dos regiones segregadas en el núcleo del reactor, conocidas respectivamente como región de la semilla y región del manto. El combustible de la región de la semilla está formado casi enteramente por material fisible, por ejemplo, uranio-235 altamente enriquecido; mientras que el combustible del manto está formado casi exclusivamente por un material fértil tal como el uranio-238 o el torio-232. Al considerar el uranio-238, es de notar que el uranio que se encuentra naturalmente es uranio-238 con un contenido aproximado del 0,7% de material fisible (U-235). No obstante, grandes cantidades de uranio natural son sometidas a tratamiento en plantas de difusión para conseguir la separación del material fisible. En subproducto de estas plantas es el uranio-238 con bajo contenido de material fisible, y este subproducto, conocido como "uranio agotado", contiene, aproximadamente, el 0,22% de material fisible (U-235). De esta forma, entre los materiales fértiles adecuados para el manto se encuentran el torio, el uranio agotado y el uranio natural. Los cálculos ilustrados en las Figuras 1 a la 5 han sido hechos considerando la región del manto como formada por torio natural, en el que predomina el torio-232 (casi el 100%), mientras que los gráficos de las Figuras 6 y 7 emplean uranio natural y uranio agotado, respectivamente.

25. CONSIDERACIONES SOBRE EL CONTROL DEL REACTOR

En relación con la invención, ha de observarse que

314669



existen varios métodos para controlar el exceso de reactividad en un reactor nuclear.

Los métodos de control incluyen: (1) varillas movibles de veneno (conocidas como varillas de control);

5. (2) veneno quemable fijo; (3) combustible móvil dentro y fuera del núcleo del reactor; (4) variación de la concentración de agua pesada en agua ligera (D_2O en H_2O) en los reactores moderados por agua y (5) control homogéneo del veneno. Al considerar la capacidad de control o variación

10. de éste en relación con la presente invención, se hace referencia a la diferencia entre la reactividad máxima y mínima del núcleo del reactor a plena potencia. Es sabido que usando los cuatro primeros métodos de control antes

15. descritos, hay límites prácticos sobre el valor de la variación de la reactividad o variación de control para un reactor dado. Un número de reactores actuales están diseñados para que la variación máxima de control (exceso de reactividad máximo disponible en equilibrio de plena potencia en cualquier punto de la vida) es del orden del

20. 10% ($0,10 \Delta K_{eff}$). Utilizando una o más de las combinaciones de los cuatro primeros métodos de control, los reactores pueden ser diseñados para una variación de control de hasta el 30% ($0,20 \Delta K_{eff}$). No obstante, usando el tipo de control con veneno homogéneo, en el que un ve-

25. neno con un alto grado de solubilidad en un refrigerante

314669



es mezclado con éste, el control oscila en más de un 30% (0,30 ΔK_{eff}). Hay que señalar, no obstante, que de acuerdo con las enseñanzas de la invención, la provisión de un control por veneno para un alto grado de variación

5. en el control, ejerce una influencia adversa sobre la vida útil del núcleo del reactor. Resulta ésto cierto por que el control por veneno malgasta realmente neutrones, ya que absorbe aquellos neutrones que podrían convertir en fisible el material fértil y provocar la fisión del

10. combustible fisible para producir más energía. En relación con los gráficos de las Figuras 1 a la 7, se ha supuesto en ellas un tipo de control de varilla móvil (caso (1) anterior). Si se utilizan otros de los tipos de control de veneno antes identificados, o si se varía la

15. concentración de agua pesada, solo se producirían pequeñas variaciones en los gráficos de las Figuras 1 a la 5. Si se utiliza el control de combustible móvil, el grosor de la semilla debe quedar entendido como grosor máximo. Con el sistema de control de combustible móvil, es posi-

20. ble elegir de nuevo un grosor máximo de semilla y una relación de masas que produzca un reactor con un exceso de reactividad mínima, resultando una más larga vida útil del núcleo. En este caso, las vidas útiles serían comparativamente más altas ya que se pierden neutrones en los

25. venenos.

314669



CONSIDERACIONES GEOMETRICAS

Según se describirá en detalle en relación con las Figuras 8 a la 10, la invención contempla el empleo de una forma geométrica semilla-manto que viene siendo

5. una cosa intermedia entre la simple disposición de la semilla del reactor de Shippingport y la del reactor ligeramente enriquecido o sin semilla. De acuerdo con la invención, se elige una geometría en la que el manto o región fértil del reactor queda expuesto, lo más uniformemente
10. posible a la semilla para obtener una radiación relativamente uniforme en el manto; con todo, se han previsto semillas separadas y mantos, siendo solo controladas las semillas para obtener las ventajas asociadas al reactor de semilla-manto. Para obtener una irradiación uniforme,
15. debe reducirse al mínimo el contraste entre pico de combustión y el valor medio en el manto. Es necesaria una relación de combustión de pico a media menor de 2,5, mientras que en la disposición de la Figura 9 la razón del pico de combustión al valor medio, en el manto es aproximadamente de 1,7. Una geometría adecuada para obtener
20. esta irradiación uniforme del manto, comprende la provisión de un número de semillas separadas en el núcleo del reactor, teniendo asociados, cada una de ellas, sus medios de control y una región del manto dispuesta adyacente a las
25. mismas para los fines de irradiación.

314660



Al proveer una geometría con un número de semillas espaciadas, se observará que éstas pueden adoptar diversas configuraciones transversales, por ejemplo, la sección cuadrada de la Figura 8, la sección circular de la Figura 9 o la sección transversal anular de la Figura 10. Estas variaciones geométricas de la configuración de las semillas afectará ligeramente a la situación de las curvas de las Figuras 1 a la 5. No obstante, todas estas configuraciones están dentro del campo de la invención, y los principios de la misma que serán señalados particularmente después, son igualmente aplicables a cada una de dichas configuraciones transversales. En el trazado de los gráficos de las Figuras 1 a la 7 se observará, no obstante, que se ha utilizado una sección transversal circular (como la mostrada en la Figura 9). Como resultado de ésto, todas las referencias al grosor de la semilla se hacen en términos del radio de ésta, considerándola dispuesta centralmente y con sección transversal circular.

Al considerar la geometría, se hace referencia al "grosor" de la semilla. Así, para una semilla circular, su grosor viene definido por el radio del círculo. Para una semilla de sección transversal cuadrada, se toma una cantidad similar al radio de un círculo, pero que sea equivalente al grosor medio del cuadrado desde el centro de éste. Para una semilla anular, el grosor de la mis-

314669



ma comprende la diferencia entre los radios de los círculos grande y pequeño que forman el anillo. La sustitución de las semillas cuadradas por las circulares utilizadas en los cálculos de los gráficos de las Figuras 1 a la 5, no produciría variaciones sustanciales en las ilustraciones gráficas de las Figuras 1 a la 5, aún cuando podría haber un pequeño corrimiento en los valores numéricos de algunas cantidades tales como la relación de masas, vida útil o variación de control, siendo siempre dichas variaciones de pequeño orden.

Para realizar los cálculos resultantes de los gráficos de las Figuras 1 a la 5, se utiliza la cantidad "relación de masas". El valor de la relación de masas, se define aquí como la razón entre el combustible fisible y el combustible total, comprendiendo este último ambos combustibles: el fisible y el fértil. Todas las curvas de las Figuras 1 a la 5 están calculadas sobre la base de utilización de la misma cantidad de combustible fisible. Para obtener una variación en la relación de masas, deberá suponerse la sola variación de la cantidad de combustible fértil.

Debe observarse también que la vida útil de un reactor varía monotónamente con el contenido de combustible fisible del reactor. En otras palabras, cuando se aumenta la existencia de combustible fisible man-



314669

teniendo una relación de masas constante, se aumenta la vida útil del reactor, para su funcionamiento a un nivel dado de potencia. En los cálculos resultantes de los gráficos de las Figuras 1 a la 5, se ha supuesto para todos

- 5. los casos una máxima densidad de potencia para las semillas (kilovatios por litro). La salida de potencia por unidad de carga de material fisible $\frac{\text{Megavatios}}{\text{Toneladas métricas } U^{235}}$ se ha seleccionado en todos los ejemplos descritos aquí a $385 \frac{\text{Mw}}{\text{TM } U^{235}}$.
- 10. De aquí, que las vidas útiles calculadas son una medida directa de la energía obtenida por unidad de carga de material fisible.

PARAMETROS DE LA SEMILLA

- 15. Los cálculos de las Figuras 1 a la 5 fueron realizados con la intención de llevar al máximo la vida útil y, por tanto, de hacer máximo el contenido de material fisible contenido en la semilla. Además, resulta ventajoso reducir al mínimo la relación de átomos del material estructural al combustible de las regiones de la semilla. Así, resultó máxima la densidad del combustible fisible en los
- 20. elementos combustibles de la semilla. Esta densidad está limitada actualmente por consideraciones metalúrgicas para que puedan producirse, aproximadamente, 30×10^{20} fisiones/cc. Para una semilla formada por uranio-235, esto implica una densidad de átomos dentro del revestimiento
- 25. de los elementos combustibles de semilla de $37,5 \times 10^{20}$ átomos/cc.

314669

25



El rendimiento de la semilla en la producción de un exceso de neutrones (para su uso en el manto) es sensible a la relación entre los átomos de hidrógeno y los átomos del combustible fisible. En el caso de semilla cargada con uranio-235, resulta óptima una relación de 60 a 75 entre los átomos de hidrógeno y los del uranio-235. Para un rendimiento óptimo en vida útil, la relación media de vida útil debe estar en este margen.

En los ejemplos ilustrativos presentados en las Figuras 1 a la 7 de la presente, se emplearon $37,5 \times 10^{20}$ átomos de uranio-235/cc. en el interior del revestimiento de una varilla combustible de 7,112 mm. de diámetro. La relación de hidrógeno a uranio-235 fué elegida, para el comienzo de la vida de 30,2. Así, contando con los necesarios componentes estructurales de la semilla y la densidad del agua, la relación en la semilla de volúmen de metal a agua fué de 0,75.

PARAMETROS DEL MANTO O ZONA FERTIL

Con respecto a la construcción del manto del núcleo de un reactor, se ha señalado antes aquí que, como combustible fértil, puede utilizarse el uranio natural conteniendo 0,7% de uranio fisible U-235, el torio sin contenido de material fisible o el uranio natural agotado. Por cuanto hay un efecto adverso sobre los requisitos de vida útil y de control producido por el uso de material fértil que tenga un ligero enriquecimiento fisil, los cálculos utilizados para la obtención



314669

de las curvas de las Figuras 1 a la 5 fueron hechos sobre la base de torio-232 como material fértil del manto. Para las curvas de las Figuras 6 y 7, todas las variables fueron mantenidas igual que para las Figuras 1 a la 5, con

5. la excepción de que el material del manto para la Figura 6 es uranio natural, y para la Figura 7 uranio agotado.

Para obtener una larga vida útil, el manto debe generar toda la potencia que sea posible empleando los neutrones producidos en la semilla. El rendimiento con esto

10. se realiza dependiendo de la relación entre los átomos moderadores y los átomos del combustible fértil. En los ejemplos específicos de las Figuras 1 a la 5, la consideración importante es la relación de átomos de hidrógeno a los átomos de torio en el manto. En el caso de que la relación hidrógeno a torio sea incrementada en un valor muy bajo (por ejemplo 0,5), resulta incrementada la relación entre la potencia producida y el residuo producido por el uranio-233. Al mismo tiempo, se incrementa la absorción parásita en el hidrógeno y, para relaciones mayores de 3 entre el hidrógeno y el torio, decrece la eficiencia del manto en el empleo de los neutrones procedentes de la semilla. Para una semilla de uranio-235, se elegirá una relación de hidrógeno a torio de hasta 3,0, dependiendo del valor relativo de la potencia y de la producción de uranio-233. Una elección de esta relación por encima del valor 4 es poco probable. Para el ejemplo
- 15.
20. ✓
- 25.

314669



plo ilustrativo de esta invención descrito en las Figuras 1 a la 5, se empleó una relación hidrógeno a torio de 3. Para un elemento combustible de manto comprendiendo una varilla de 17,121 mm. de diámetro, se utiliza una relación 5. de metal-a agua en el manto de 1,29 con óxido de torio (ThO_2) del 80% de densidad y una densidad de agua de .0,76 g/cc.

Es preciso observar, además, que todos los cálculos han sido hechos sobre la base de un gran reactor de agua a presión, en el que el agua ligera (H_2O) se utiliza tanto 10. como refrigerante como material moderador. La fuga de neutrones de esta reacción se supuso de un 2% correspondiente a un reactor en el margen (eléctrico) de 500 Mw.

REACTORES CON MANTO DE TORIO

Con referencia ahora a la Figura 1 de los dibujos, 15. puede verse que la Figura 1 comprende grupos de gráficos dibujados como Figuras 1A, 1B y 1C, las cuales muestran los efectos de una variación en la relación del combustible (combustible fisible/combustible total) y los efectos de una variación en el grosor de la semilla sobre el exceso 20. de reactividad (al que se ha hecho referencia aquí como variación de control, control requerido, o ΔK_{eff}) y vida útil de un reactor de semilla-manto. En la Tabla I, que se muestra a continuación, puede verse que las curvas A, B, C, D y E de la Figura 1A dibujan el efecto anteriormente des- 25. crito para grosores de semilla de 0, 5, 10, 15 y 20 centí-

34660



metros respectivamente, para una relación de combustible de 0,075.

TABLA I

	Curva	Grosor semilla (cm)	Relación de masas combustibles (Combustible fisil) (Combustible total)	Control requerido (máximo) ΔK_{eff}	Vida útil horas
5.	A	0	0,075	0,40	53.000
10.	B	5	0,075	0,21	61.500
	C	10	0,075	0,17	66.000
	D	15	0,075	0,18	65.500
	E	20	0,075	0,27	62.500
	F	0	0,050	0,29	50.000
	15.	G	5	0,050	x
H		10	0,050	x	x
J		15	0,050	0,10	64.500
K		20	0,050	0,25	58.000
L		0	0,025	0,05	16.000
20.	M	5	0,025	xx	xx
	N	10	0,025	xx	xx
	P	15	0,025	0,06	13.500
	Q	20	0,025	0,24	40.000

x Exceso de reactividad negativa al comienzo de la vida.

xx Exceso de reactividad negativa durante toda la vida.

314669



25

- A la vista de la curva A, puede verse que para una semilla de grosor cero, (por ejemplo, en un reactor ligeramente enriquecido) el máximo exceso de reactividad ocurre al comienzo de la vida y vale $0,40 \Delta K_{eff}$. Así, para construir
5. el reactor descrito por la curva A, sería necesario un medio de control capaz de absorber una variación de control de $0,40 \Delta K_{eff}$. En igual forma, donde el grosor de la semilla es de 20 cm., según se dibuja por la curva E de la Figura 1A, el exceso de reactividad se produce también en el comienzo
 10. de la vida y vale $0,28 \Delta K_{eff}$. Se apreciará, no obstante, que cuando el grosor de la semilla varía entre 0 y 20 centímetros, según puede verse en las curvas B, C y D, decrece el máximo del exceso de reactividad o control requerido para un reactor. Suponiendo un reactor capaz de acomodar una
 15. variación de control de $0,20 \Delta K_{eff}$, se verá en las curvas C y D que los reactores que tengan un grosor de semilla entre 10 y 15 centímetros pueden tener una vida útil de unas 65.000 horas.

- En la Figura 1A, la curva 12 dibujada en línea de
20. trazos pasa a través de los puntos de máximo exceso de reactividad de cada una de las curvas A, B, C, D y E. Puede apreciarse en la curva 12 que existe un margen óptimo en los grosores de semillas en el que se reduce el control necesario para un determinado reactor de semilla-manto. Las
 25. Figuras 1B y 1C ilustran el efecto de una variación en la



314669

relación de combustible sobre la cantidad de control requerida y vida útil en un reactor de semilla-manto. En la Figura 1B, se ha elegido una relación de combustible de 0,050 para las curvas F, G, H, J y K. Para las curvas L, M, N, P y Q, de la Figura 1C, se ha elegido 0,025. Otros parámetros relativos a las curvas F, G, H, J y K y las curvas L, M, N, P y Q de las Figuras 1B y 1C se establecen detalladamente en la Tabla I.

La curva 14 de la Figura 1B está trazada a través de los puntos de máximo exceso de reactividad de las curvas F, G, H, J y K, siendo, por tanto, similar a la curva 12 de la Figura 1A. Se ha trazado, además, la curva 16 a través de los puntos de máximo exceso de reactividad de las curvas L, M, N, P y Q. Por las curvas 12, 14 y 16, puede apreciarse que el efecto básico de la disminución de la relación de combustible es el decremento del valor de control requerido para una vida útil dada. A la vista de las curvas G y H de la Figura 1B se verá, no obstante, que el descenso de la relación de combustible tiene a veces un efecto adverso en la construcción de un reactor. Puede verse que los puntos 18 y 20 de las curvas G y H, respectivamente, determinan el mínimo exceso de reactividad de los reactores descritos por las curvas G y H al principio de la vida. Este mínimo de exceso de reactividad cae por debajo del punto O, por lo que los reactores construídos siguiendo los parámetros de las cur-



314669

- vas G y H no podrán alcanzar el punto crítico en algún momento del principio de su vida. En consecuencia, las construcciones de reactores de las curvas G y H no pueden ser utilizadas, y tales reactores tienen, en efecto, una vida
5. útil igual a cero. Similarmente, para las curvas M y N de la Figura 1C, no hay ningún punto en la vida en el cual el reactor alcance el valor crítico, mientras que para las curvas L y P de la Figura 1C, el final de la vida útil ocurre en un intervalo de tiempo relativamente pequeño.
 10. Hay que observar, por supuesto, que la vida útil de energía de los reactores construídos siguiendo estas curvas (curva J, por ejemplo), es del orden de $25 \times 10^6 \frac{\text{MWD}}{\text{Tm U}^{235}}$. La vida útil de energía hasta la primera reposición de combustible de los reactores actuales de semilla-manto, es del
 15. orden de $10 \times 10^6 \frac{\text{MWD}}{\text{Tm U}^{235}}$. Se observará en las curvas 12, 14 y 16 que un decremento de la relación de combustible produce una disminución en los requisitos de control para un grosor de semilla dado. No obstante, a la vista de las Figuras 1B y
 20. 1C, puede apreciarse, además, que disminuyendo mucho la relación de combustibles, resulta una disposición de reactor en la cual, para ciertos grosores de semilla, el reactor no podrá alcanzar el punto crítico en algún momento del principio de su vida. Puede verse también que existe un margen óptimo de relaciones de combustible y grosores de semilla en el que
 25. se empareja la relación óptima de combustibles con el grosor



394889

óptimo de semilla, en forma tal, que se consigue una larga vida útil con una disminución de la variación de control para una carga dada de combustible.

Los gráficos de las Figuras 2 y 3 resumen las conclusiones anteriores. Más particularmente, el gráfico de la Figura 2 comprende un trazado de las curvas 12, 14 y 16 de las Figuras 1A, 1B y 1C, mostrando el efecto del radio de la semilla en el requisito de control o variación de éste para distintas relaciones de combustible. Las curvas 12, 14 y 16 de las Figuras 1A, 1B y 1C están referenciadas por los mismos números que en la Figura 2. Mirando la Figura 2 y el resumen de la misma en la Tabla II se verá que, según se dijo antes, una disminución en la relación de combustibles y una optimización del grosor de la semilla, produce un reactor en el cual puede reducirse al mínimo la cantidad de control requerido.

TABLA II

Curva Nº	Relación de masas de combustible (Combustible fósil) (Combustible total)	Grosor de la semilla en el punto mínimo (cm)	Control requerido en el punto mínimo (ΔK_{eff})
22	0,10	13	0,24
12	0,075	11	0,17
14	0,050	9	0,08
16	0,025	12	Valor negativo.



34669

Para la curva 16 existe un rango de grosores de semilla en el cual el reactor no producirá nunca un exceso de reactividad positiva.

Las curvas de la Figura 3 se ilustran aquí para
5. dibujar ciertas construcciones de reactores que están excluidas debido a la formación de un exceso de reactividad negativa en el punto del principio de su vida.

A la vista de las curvas B, C, D, G, H, J y N de las Figuras 1A, 1B y 1C, se aprecia que, cuando se ha elegido una forma geométrica tal que el grosor de la semilla esté comprendido dentro de un margen óptimo predeterminado, con una relación de combustibles dentro de otro margen óptimo predeterminado, se produce en algún punto del comienzo de la vida una depresión en la curva de reactividad, según se
10. ilustra por los puntos 18 y 20 de las curvas G y H, respectivamente. La Figura 3 comprende los trazados de los puntos bajos o depresiones 18 y 20 para diferentes relaciones de combustible y diferentes grosores de semilla. Las curvas 26, 28, 30, 32 y 34 de la Figura 3 dibujan la provisión de un
20. reactor de semilla y manto con relaciones de combustible de 0,10; 0,075; 0,05; 0,04 y 0,025, respectivamente. La escala vertical del gráfico de la Figura 3 representa la variación de control o cambio en la multiplicación del núcleo (ΔK_{eff}) en puntos de la vida temprana. En la escala horizontal se
25. muestra un margen de grosores de semilla desde 0 a 20 cen-

314669



tímetros. Al considerar un diseño de reactor, es necesario determinar si la multiplicación del núcleo descenderá por debajo del punto cero en algún momento del principio de la vida. En el caso de que se produzca esta condición, el reactor no podrá sostener el control de la reacción en cadena y dejará de funcionar. Como resultado de este fenómeno, el área del gráfico de la Figura 3 por debajo de la línea ΔK_{eff} cero, está sombreado para ilustrar el hecho de que los reactores que tengan grosores de semilla y relaciones de combustible que produzcan variaciones de control por debajo de la línea cero, son inoperativos y constituyen, por tanto, casos excluidos. La Tabla III presenta el margen de casos excluidos para las diferentes relaciones de combustible mostradas por las curvas 26, 28, 30, 32 y 34.

15.

TABLA III

<u>Curva N°</u>	<u>Relacion de combustibles (Masa combustible fisil) (Masa combustible total)</u>	<u>Margen de grosores de semilla excluido de (centímetros)</u>
26	0,100	Ninguno
20. 28	0,075	Ninguno
30	0,050	4,4 a 12,8 cm.
32	0,040	2,6 a 13,8 cm.
34	0,025	Menos de 14,0 cm.

Por ejemplo, si la relación de combustibles es de 0,10 ó de 0,075, no hay ningún grosor de semilla que pueda

25.



34669

ser excluido a causa del exceso de reactividad negativa en el principio de la vida. Sin embargo, por la curva 30 puede verse que con una relación de combustibles de 0,05, deben ser excluidos los grosores de semilla variables entre 5. 4,4 y 12,8 ya que el exceso de reactividad del reactor, en el comienzo de la vida, se hace negativa.

No obstante, hay que observar, que las curvas de las Figuras 2 y 3 identifican casos que resultan indeseables por sus grandes requisitos en materia de control, o bien que resultan excluidos por virtud de la negatividad del exceso de reactividad en el comienzo de la vida.

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONTROL

Las regiones de exclusión y de requisitos de grandes variaciones del control se hallan resumidas en el gráfico de la Figura 4, el cual comprende un trazado cruzado de los gráficos de las Figuras 2 y 3. Más particularmente en la Figura 4, se ha representado en el eje vertical la relación de masas variable desde 0 a 0,10. En el eje horizontal se representa el grosor de la semilla, el cual varía de 0, a 20 centímetros. Según se ha indicado en la Tabla IV, la curva 36 de la Figura 4 representa aquellos puntos en los que el mínimo del exceso de reactividad, al comienzo de la vida, se iguala a cero.

314669



TABLA IV

<u>Curva N°</u>	<u>Lugar para el cual el máximo control requerido durante la vida útil, es:</u>
5. 38	0,10 ΔK_{eff}
40	0,15 ΔK_{eff}
42	0,20 ΔK_{eff}
44	0,25 ΔK_{eff}
46	0,30 ΔK_{eff}
10. 36	Lugar para el cual el mínimo del exceso de reactividad en el comienzo de la vida, es cero.

Todos los puntos dentro de la curva 36 están en la zona rayada para representar los casos excluidos (similares a los casos excluidos de la Figura 3) para los reactores construidos con relaciones de masa y grosores de semilla que caigan por debajo de la curva 36, y que tendrán exceso de reactividad negativa en el comienzo de la vida. Las curvas 38, 40, 42, 44 y 46, representan márgenes de relaciones de masa y grosores de semilla que requieren 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; y 0,30 ΔK_{eff} .

15. Así, un diseñador de reactores, sabiendo el valor de variación de control que desea introducir en el diseño de un reactor puede, mediante el uso de la Figura 4, determinar la relación de masas y grosor de semilla que caigan por debajo de la capacidad de control del sistema de control del reactor. Además,

20. el diseñador del reactor, sabrá inmediatamente si su elección de relación de masas y grosor de semilla es tal que producirá

34669



- exceso de reactividad negativa al comienzo de la vida (es decir, si caerá por debajo de la curva 36). Mediante la curva 38 puede apreciarse que la región del 10% de control cae en cierto grado dentro de la región de los casos excluidos, y la curva 38 se ha dibujado, por tanto, en dos áreas separadas. Además, la curva 46 muestra que, cuando hay reactores capaces de acomodar $0,30 \Delta K_{\text{eff}}$ de control, pueden escogerse relaciones de combustibles muy altas (de más de 0,10) para grosores de semilla mayores de 7 centímetros.
10. CONSIDERACIONES SOBRE LA VIDA UTIL
- Aunque las curvas de la Figura 4 resultan útiles para el diseñador de reactores desde el punto de vista de la determinación de la cantidad de control requerido, y para la determinación de aquellas construcciones que deben ser excluidas, estas curvas no proporcionan información sobre la duración de vida útil de los reactores para los que se han seleccionado los grosores de semilla, relaciones de masas y capacidad de control. Las curvas de la Figura 5 presentan un duplicado exacto del gráfico de la Figura 4 sobre el que se han superpuesto curvas de vida constante. Las curvas 48, 50, 52, 54 y 56 son indicadoras de vida útil constante para núcleos de reactor con vidas útiles de 67.500; 65.000; 62.500; 60.000 y 50.000 horas, respectivamente. Los valores específicos para las curvas de la Figura 5 se establecen en la Tabla V.

314669



TABLA V

	<u>Curva Nº</u>	<u>Control máximo requerido (ΔK_{eff})</u>	<u>Curva Nº</u>	<u>Vida útil obte- nible del núcleo. (horas)</u>
5.	36	----x	48	67.500
	38	0,10	50	65.000
	40	0,15	52	62.500
	42	0,20	54	60.000
	44	0,25	56	50.000
10.	46	0,30		

x La curva 36 representa el lugar por debajo de la cual los reactores tienen sustancialmente una vida útil igual a cero).

A la vista de la Figura 5 puede apreciarse que existe un margen de construcciones factibles para reactores con los que pueden lograrse más de 67.500 horas de vida útil con plena potencia. Estas vidas útiles exceden en una cantidad apreciable el máximo de vida útil obtenible en la actualidad para los núcleos de los reactores. Mediante la utilización de la Figura 5 el diseñador de reactores puede determinar por anticipado la vida útil del tipo de construcción del reactor para un grosor de semilla y relación de combustibles determinados, y puede determinar también la cantidad necesaria de variación de control para el reactor. Por ejemplo, si el diseñador del reactor desea una vida útil de más de 67.500 horas



314669

a plena potencia, y desea establecer un control próximo a $0,10 \Delta K_{\text{eff}}$, podrá elegir un grosor de semilla y relación de masa en una zona que caiga junto a las curvas 36, 38 y 48. Esta zona queda indicada por el carácter de referencia 58. En

5. el caso de que el diseñador desee una vida útil de 65.000 horas y pueda proveer un control de hasta $0,20 \Delta K_{\text{eff}}$, puede elegir una geometría para el reactor con relación de masa y grosor de semilla que caigan en el área comprendida entre

10. las curvas 50 y 36. Dependiendo específicamente de la relación de masas y del grosor de semilla, la cantidad de control puede variar desde menos de $0,10 \Delta K_{\text{eff}}$ (entre las curvas 38, 36 y 50) hasta aproximadamente $0,10 \Delta K_{\text{eff}}$. Las curvas de la Figura 5 indican la conveniencia de hacer óptimos el grosor de semilla y relación de masas para minimizar la variación de

15. control (la máxima reactividad de exceso durante la vida útil del reactor) y conseguir la máxima vida útil del reactor. Por ejemplo, en las curvas 48, 50 y 52, puede verse que, a medida que disminuye la vida útil del reactor, puede aumentarse la cantidad de control requerida. Existe así una optimización de

20. los valores de relación de masas y grosor de semilla, la cual produce no solo más largas vidas útiles, sino que también disminuye la cantidad de control requerida. De acuerdo con la Figura 5, puede obtenerse una vida útil máxima de 68.000 horas en el punto indicado por la referencia 60, siendo el con-

25. trol requerido de $0,12 \Delta K_{\text{eff}}$ y el grosor de semilla de 11,5



314669

centímetros con una relación de masa de 0,058.

MANTOS DE URANIO NATURAL Y DE URANIO AGOTADO

Como se ha señalado anteriormente, el material del manto utilizado para formar las curvas de las Figuras 4 y 5

5. fué el torio-232 con un enriquecimiento físil igual a cero. Como puede verse en las Figuras 6 y 7, en el caso de utilizar uranio agotado o uranio natural, hay un enriquecimiento físil positivo, aún cuando relativamente pequeño, asociado con el manto. El efecto de la existencia de un enriquecimiento físil en la región del manto del reactor, sirve para

10. reducir sustancialmente la región de los casos excluidos (el área definida por la curva 36) de la Figura 5 y también para reducir la vida útil del núcleo.

Con referencia ahora a la Figura 6 de los dibujos,

15. se representa en ella un gráfico en cuyo eje horizontal se dan los grosores de semilla, y la relación de masas en el eje vertical. Para este gráfico se ha elegido un manto formado por uranio natural. Con esta excepción, todas las demás constantes y materiales descritos en relación con los gráficos de las Figuras 1 a la 5 permanecen iguales.

20.

La Curva 90 de la Figura 6 define un área que representa una región de grosores de semilla y relaciones de masas excluidos por no permitir que el reactor permanezca crítico durante toda su vida útil. Cada una de las curvas

25. 92, 94, 96, 98, 100 y 102 representan la cantidad de con-

204669



trol requerido (ΔK_{eff}) para diferentes relaciones de masa y grosores de semilla. Estas últimas curvas pueden ser consideradas, por tanto, como los lugares de diferentes requisitos de control, según se establece en detalle en la

5. Tabla VI. En igual forma, las curvas 108, 110, 112, 114 y 116 representan los lugares de vidas útiles constantes, según se establece en detalle en la Tabla VI.

TABLA VI

Manto de uranio natural

10.	<u>Curva N°</u>	<u>Control requerido</u> <u>(ΔK_{eff})</u>	<u>Curva N°</u>	<u>Vida útil</u> <u>horas</u>
	90	----x	108	45.000
	92	0,10	110	50.000
	94	0,15	112	55.000
15.	96	0,20	114	57.000
	98	0,25	116	58.000
	100	0,30		
	102	0,35		

x La curva 90 representa aquellos puntos en el mínimo de exceso de reactividad de la semilla, en el comienzo de la vida, se hace igual a cero.

Así, un diseñador de reactores, usando el gráfico de la Figura 6, puede determinar los valores deseados de vida útil, requisitos de control, relación de masa y grosor de

25. semilla que satisfagan los requisitos para una determinada



314669

construcción de un reactor, utilizando un manto de uranio natural. Por ejemplo, si el diseñador del reactor puede acomodar un control de ΔK_{eff} de 0,20, el diseño del reactor deberá tener un grosor de semilla y relación de masa que caigan entre las curvas 96 y 90 de la Figura 6. Si, el diseñador del reactor desea una vida útil de, al menos, 45.000 horas, la relación de masa y grosor de semilla deberán elegirse para que caigan entre las curvas 96 y 108 de la Figura 6. En la misma forma, cuando se desee una vida útil de más de 50.000 horas, el diseñador elegirá un grosor de semilla y relación de masa que caigan dentro del área definido por las curvas 96 y 110.

Comparando las curvas de la Figura 6 con las del gráfico de la Figura 5, se apreciará que la región de casos excluidos definida por la zona sombreada de debajo de la curva 90 es sustancialmente menor que la región correspondiente definida por la curva 36 de la Figura 5. Según se ha explicado, con uranio natural resulta menor la región excluida debido al contenido fisible del uranio natural. Puede verse también un efecto concurrente con la provisión de material fisible en la región del manto cuando se consideran los lugares de vida útil constante (curvas 108, 110, 112, 114 y 116). Resulta de toda evidencia que el incremento de vida útil del núcleo del reactor con manto de uranio natural, requiere un incremento en la capacidad de control del reactor; aún cuando en la

3-36-669



x La curva 120 representa aquellos puntos en los que el exceso de reactividad mínima, en el comienzo de la vida, se iguale a cero.

En la Figura 7 y Tabla VII puede apreciarse que

5. la región de casos excluidos, para el manto de uranio agotado, es mayor que para el manto de uranio natural, pero resulta todavía sensiblemente menor que la región de los casos excluidos para un manto de torio.

Se apreciará, además que los lugares de vidas útiles

10. las constantes de la Figura 7 indican que, a medida que se incrementa la vida útil, la capacidad mínima de control del reactor, debe ser incrementada. Este último efecto existe para el manto de uranio agotado, manto de uranio natural y manto de torio, pero para este último, cuando se incrementa

15. la vida útil, el incremento en los requisitos de control es mínimo.

Si se utiliza un manto de uranio agotado, el diseñador del reactor puede elegir los valores adecuados para el grosor de semilla y relación de masas para que caigán dentro

20. de la capacidad de control deseada para el reactor, pudiendo determinar así la vida útil del reactor diseñado. El diseñador de reactores que desee construir un reactor que tenga una capacidad de control de $0,20 \Delta K_{\text{eff}}$ elegiría una relación de masa y grosor de semilla que caiga entre las curvas

25. 126 y 120 de la Figura 7. Si el diseño del reactor pide una

314669



duración de vida útil de más de 50.000 horas, con una capacidad de control de $0,20 \Delta K_{\text{eff}}$, la relación de masas y el grosor de semilla deberán ser elegidos para que caigan dentro del área existente entre las curvas 120 y 126 y por encima de la 142. Se apreciará que mientras una vida útil de 55.000 horas requiera $0,23 \Delta K_{\text{eff}}$ para un manto de uranio natural, con solo $0,15 \Delta K_{\text{eff}}$ puede obtenerse el mismo periodo de vida útil con manto de uranio agotado. (Nótese nuevamente que se ha supuesto el mismo contenido fisible en ambos casos).

La comparación directa entre el Reactor de Shippingport y los reactores construídos según esta invención, no puede hacerse por numerosas razones. Con el primer núcleo de reactor de Shippingport, se utilizó un manto de uranio natural con una relación de masas de combustible fisible a combustible fisible más fértil de 0,013. El grosor de la semilla en Shippingport era de 14 centímetros, no obstante, la geometría del núcleo del reactor (semilla anular sencilla) no era la apropiada para proporcionar la uniformidad de exposición del manto a la semilla requerida por esta invención. El empleo de una geometría adecuada puede expresarse mejor, como ya antes se señaló, como una geometría de semilla-manto en la que la combustión de pico a la media, en el manto del reactor, sea menor de 2,5. Otro factor que impide la comparación directa entre el reactor de Shippingport y

314669



25

los reactores de la presente invención, es la relación de arrastre del núcleo. Esta relación puede ser considerada como la relación entre potencia a masa fisible

($\frac{\text{Megavattios}}{\text{Toneladas métricas U}^{235}}$). En el reactor de Shippingport, el

5. núcleo fué diseñado con relación potencia a masa fisible de $1390 \frac{\text{Mw}}{\text{Tm U}^{235}}$, mientras que con los ejemplos de la presente invención la relación es de $\frac{385 \text{ Mw}}{\text{Tm U}^{235}}$. Si el reactor de Shippingport hubiera sido diseñado según esta invención, habría sido necesario un cambio en la geometría del núcleo para proveer un acoplamiento lo suficientemente cerrado entre la semilla y el manto. Luego habrían podido ser llevadas al valor óptimo la relación de masa y el grosor de semilla para proveer una extensa vida útil del núcleo para cualquier potencia dada por unidad de masa fisible.

15. GEOMETRIAS ADECUADAS DE SEMILLA Y MANTO

- Con referencia ahora a las secciones transversales esquemáticas de núcleos de reactor representados en las Figuras 8, 9 y 10, se apreciará que la geometría de un reactor debe ser elegida de forma que produzca una relación de masas entre el combustible fisible y el fértil dentro de los márgenes deseados, y con una combustión de pico a media en el manto que sea igual o menor de 2,5. Se apreciará que en tanto que se elija una geometría en la que la relación de masas caiga dentro del margen deseado, y en la que la semilla y manto estén estrechamente acopladas y donde el grosor de se-
- 20.
- 25.



314669

milla se mantenga dentro del margen deseado, resultará adecuada cualquier disposición geométrica de las semillas y mantos. Las disposiciones de las Figuras 8, 9 y 10 comprenden apenas unas cuantas realizaciones ilustrativas de secciones

5. transversales de núcleos de semilla-manto, las cuales permiten un amplio margen de relaciones de masas y grosores de semillas para un estrecho acoplamiento entre semillas y manto. En la disposición de la Figura 8 se ha previsto una pluralidad de módulos separados designados por la referencia

10. 62, teniendo cada módulo una sección transversal cuadrada y un núcleo de reactor que incluye cuarente y cinco módulos 62. Cada módulo 62 incluye una semilla central 64 de sección transversal generalmente cuadrada en la que se coloca el material fisible. Rodeando cada semilla 64 hay una región de

15. manto 66 de sección generalmente anular y que contiene el material fértil. Dispuesto dentro de cada región de semilla 66 hay un adecuado medio de control del reactor, tal como la varilla móvil de control 68 presentada aquí como de sección cruciforme. Se apreciará, por tanto, que el grosor de

20. semilla de cada una de las semillas 64 está apropiadamente elegido dentro del margen de grosor que permite la deseada variación de control y vida útil del núcleo. En la misma forma, la relación de masas está elegida adecuadamente para que la relación de material fisible en la semilla con

25. la masa del combustible total por cada conjunto 62 quede

703669



dentro de un margen predeterminado. En la disposición de la Figura 9, cada uno de los módulos o conjuntos está formado, convenientemente, en sección transversal exagonal designados por la referencia numérica 70. El núcleo del reactor de

5. la Figura 9 está formado por treinta y siete módulos 70. Cada uno de los módulos exagonales 70, incluye una región central de semilla 72 de forma generalmente circular en sección transversal, y una varilla crudiforme de control 74 dispuesta dentro de la región de semilla 72. El núcleo del reactor

10. se construye mediante el mutuo ajuste entre los módulos exagonales 70.

Se apreciará que la geometría de la Figura 9, en la cual una semilla circular 72 rodeada por un manto generalmente anular 76 con una periferia exterior exagonal, fué la utilizada como forma ejemplar de módulo para la formación de los

15. gráficos de las Figuras 1 a la 7 de la presente. Cada una de las regiones de manto 76 fué elegida para su inclusión con torio-232, en la forma de óxido de torio, con un enriquecimiento cero en combustible físil.

20. Se ilustra todavía otra sección transversal de núcleo de reactor en la Figura 10, en la que se han dispuesto treinta y siete módulos exagonales 80 para formar el núcleo del reactor. En el ejemplo de la Figura 10, cada semilla comprende una región anular 82 rodeada en su periferia exterior por una región externa de manto 84. En las aberturas de

25.

314669

25



las semillas anulares 82 se han previsto los núcleos dentrales 86 del material de manto.

Los medios de control en este ejemplo de la invención están constituidos por el movimiento de las varillas de control 88, cada una de las cuales comprende un segmento circular, y encontrándose dispuestos tres de estos segmentos 88 en cada semilla 82.

Se comprenderá que hay muchas otras disposiciones geométricas que producen la deseada relación de masa y el grosor de semilla deseado, y que muchos y diferentes tipos de métodos de control y de materiales fisibles y fértiles pueden ser sustituidos por los ejemplos específicos discutidos aquí sin apartarse del ancho campo y espíritu de esta invención. De acuerdo con esto, se trata específicamente, de que los ejemplos de la invención discutidos aquí en detalle, sean interpretados como ilustrativos de la invención y no como limitativos de la misma.

N O T A

La Patente de Invención, que se solicita por veinte años, para España, de acuerdo con la vigente Legislación deberá recaer sobre: "REACTOR NUCLEAR DE VIDA LARGA DE SEMILLA Y MANTO", con Prioridad de la demanda en U. S. A. Serial nº 378.407, de fecha 26 de Junio de 1964, según las características esenciales de las siguientes



744359

REIVINDICACIONES

- 1ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, caracterizado por comprender al menos una región de semilla formada por combustible fisible, al menos una región
5. de manto formado con combustible fértil, estando dispuestos dichos combustibles fisible y fértil en dichas regiones con una relación de masa del combustible fisible al combustible fisible más el fértil comprendida entre 0,025 y 0,1; estando dispuesto dicho combustible fisible en dicha región de semi-
10. lla en forma geométrica con un grosor de semilla entre 2 y 20 centímetros, eligiéndose dicha relación de masas y dicho grosor de semilla de forma tal que el valor mínimo del exceso de reactividad en dicho reactor y cerca del comienzo de la vida de éste exceda de cero, y estando dispuestas
15. dichas regiones de semilla y manto en forma relativa tal que la combustión razón de pico a la media de combustión del manto sea menor de 2,5.

- 2ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicación 1ª, caracterizado por comprender una disposición de núcleo provisto al menos de una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha sección de manto con un material fértil seleccionado del grupo que incluye uranio natural, uranio agotado y torio-232, estando repostada dicha sección de semilla con
- 20.
25. un material fisible, teniendo dichas regiones de semilla y

314660

25



manto una posición relativa dentro de dicho núcleo para que la razón de pico de combustión a la combustión media de dicho manto sea menor de 2,5, y estando formado dicho reactor con una relación de masas entre el combustible físil más el fértil y un grosor de semilla elegidos para constituir un reactor dispuesto para una larga vida útil.

3^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones anteriores, caracterizado por comprender una disposición del núcleo con una larga vida útil, 10. teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y al menos una región de manto, estando repostada dicha región de manto con torio-232, y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio 235 15. más el torio-232 así como el grosor de la semilla están seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 48 y 36 de la Figura 5 de la presente, proveyendo dicha geometría dichas regiones de combustible y de manto en las que la razón de pico a la combustión media del manto es menor de 2,5.

20. 4^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menor una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio natural, y dicha región de semilla 25.

314660



estando repostada con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio 235 más el uranio natural, así como el grosor de la semilla han sido seleccionados para valor que queden

5. comprendidos entre las curvas 98 y 108 de la Figura 6 de la presenta, y proveyendo dicha geometría del reactor unas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico a la combustión media es menor de 2,5.

5ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y

10. manto, según anteriores reivindicaciones, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio agotado y estando repostada dicha re-
15. gión de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el uranio agotado, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores que queden comprendidos entre las curvas 126, 140 y 120 de la Figura 7 de la presen-
20. te, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico a la combustión media del manto es menor de 2,5.

6ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y

25. manto, según reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una

394660



larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando la región de manto repostada con torio-232 y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el torio-232, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 50 y 36 de la Figura 5 de la presente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico a la combustión media es menor de 2,5.

7ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio natural y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el uranio natural, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 96 y 90 de la Figura 6 de la presente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico a la combustión media es menor de 2,5.

34669



- 8^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones anteriores, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio agotado y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el uranio agotado, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 126 y 120 de la Figura 7 de la presente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico a la combustión media es menor de 2,5.
- 9^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo con ΔK_{eff} máximo menor de 0,20 durante su vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicho región de manto con torio-232 y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el torio-232, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 42, 56 y 36 de la Figura 5 de la

314669



presente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico a la combustión media del manto es menor de 2,5.

- 10^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo con un ΔK_{eff} máximo menor de 0,20 durante su vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio natural
10. y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el uranio natural, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 98 y 90 de la Figura 6
15. de la presente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico de combustión a la combustión media del manto es menor de 2,5.

- 11^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo con un ΔK_{eff} máximo, durante su vida útil, menor a 0,20, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio agotado
20. y estando repostada dicha región de semilla con uranio-
- 25.

314669



235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 más el uranio agotado, así como el grosor de semilla, han sido seleccionados para valores comprendidos entre las curvas 128 y 120 de la Figura 5. 7 de la presente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón de pico de combustión a la combustión media del manto es menor de 2,5.

12^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones anteriores, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con torio-232 y dicha región de semilla estando repostada con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el torio-232 está comprendida entre 0,062 y 0,075, teniendo dicha región de semilla un grosor comprendido entre 8 y 15 centímetros, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón del pico de combustión a la combustión media del manto es menor de 2,5.

13^a.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, de acuerdo con las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos

314669

25



- una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con uranio natural y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas
5. del uranio-235 al uranio-235 más el uranio natural está comprendida entre 0,025 y 0,035, teniendo dicha región de semilla un grosor comprendido entre 3 y 13 centímetros, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón del pico de combustión
10. a la combustión media del manto es menor de 2,5.

- 14ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según reivindicaciones anteriores, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región
15. de manto con uranio agotado y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el uranio agotado está comprendida entre 0,031 y
20. 0,042, teniendo dicha región de semilla un grosor comprendido entre 2,5 y 16 centímetros, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón del pico de combustión a la combustión media del manto es menor de 2,5.

25. 15ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y

314669

25



- manto, según reivindicaciones precedentes, caracterizado por comprender una disposición de núcleo que tiene una larga vida útil, teniendo dicho reactor al menos una región de semilla y una región de manto, estando repostada dicha región de manto con torio-232 y estando repostada dicha región de semilla con uranio-235, teniendo dicho reactor una geometría en la que la relación de masas del uranio-235 al uranio-235 más el torio-232 es de 0,068 aproximadamente, teniendo dicha región de semilla un grosor de 11,5 aproximadamente, y proveyendo dicha geometría del reactor dichas regiones de semilla y manto en las que la razón del pico de combustión a la combustión media del manto es menor de 2,5.

- 16ª.- Reactor nuclear de vida larga de semilla y manto, según anteriores reivindicaciones, caracterizado por comprender una pluralidad de regiones de semilla formadas sustancialmente por completo de combustible físil, una región de manto dispuesta adyacente a cada región de semilla y formada sustancialmente por material fértil, teniendo cada una de dichas regiones de semilla y las regiones adyacentes de manto sus relaciones de masa de combustible físil a combustible físil más combustible fértil comprendidas entre límites predeterminados, estando formada cada una de dichas semillas con un grosor comprendido en un margen predeterminado, siendo dichos límites de relación de masas y margen de grosor de semilla dependientes de la composición de di-

314669



- chas regiones de semilla y manto y estando seleccionadas cada una de ellas para hacer máxima la vida de dicho reactor y minimizar el exceso de reactividad máxima durante la vida útil de dicho reactor, y estando relativamente dispuestas dichas regiones de semilla y manto para proporcionar una razón de pico de combustión a combustión media del manto de menos de 2,5.

17^a.- REACTOR NUCLEAR DE VIDA LARGA DE SEMILLA Y MANTO.

10. Según queda sustancialmente descrito en la presente memoria, que consta de cincuenta y una hojas, escritas a máquina por una sola cara y dibujos.

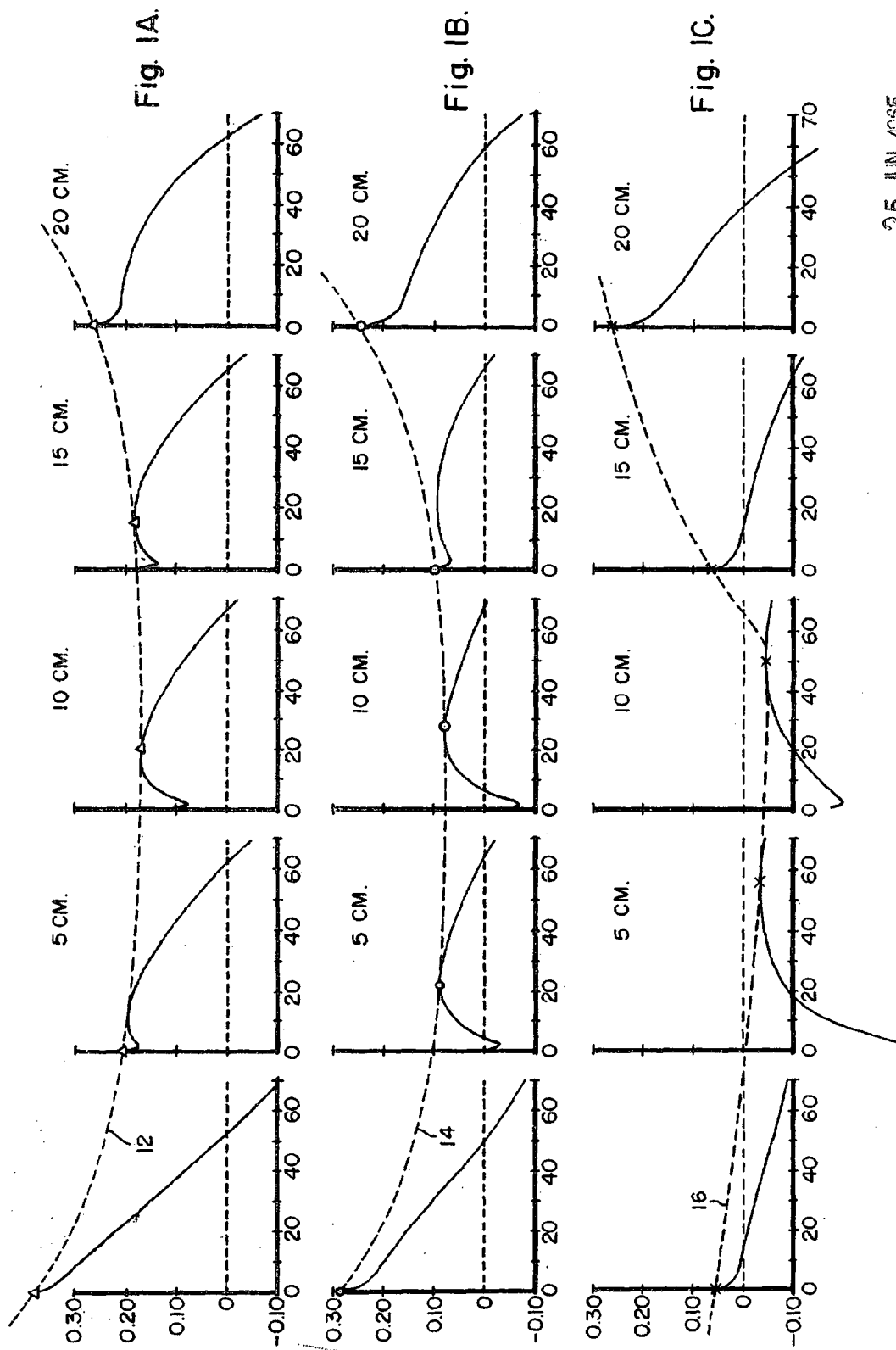
Madrid, 25 JUN. 1965

UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION
P. P.

Francisco

1000000

25



Escola variable

Madrid, 25 JUN 1965

UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION
P. P.

Frank and Smith

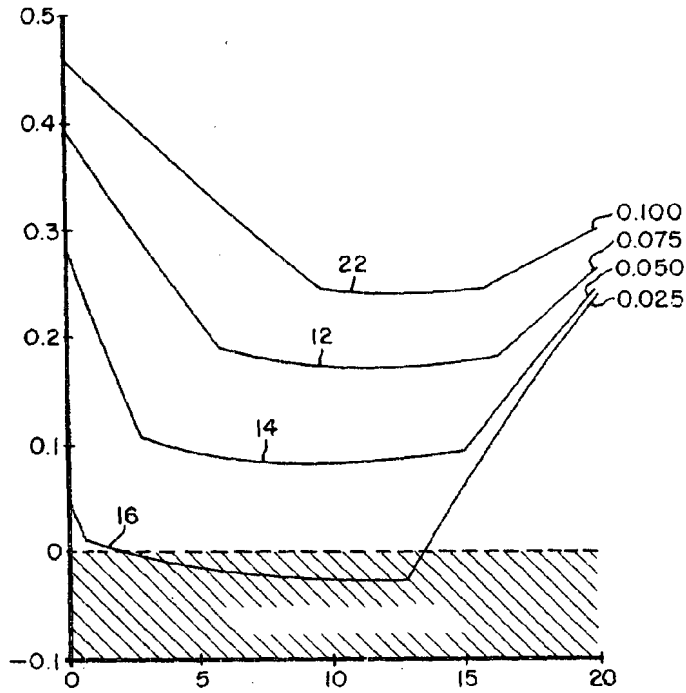


Fig. 2.

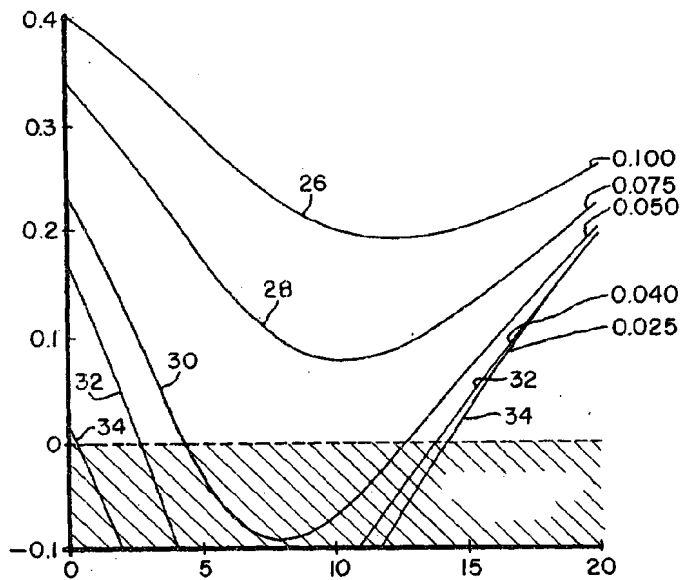


Fig. 3.

Madrid, 25 JUN 1955

UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION

P. P.

Escala variable



25

Fig. 4.

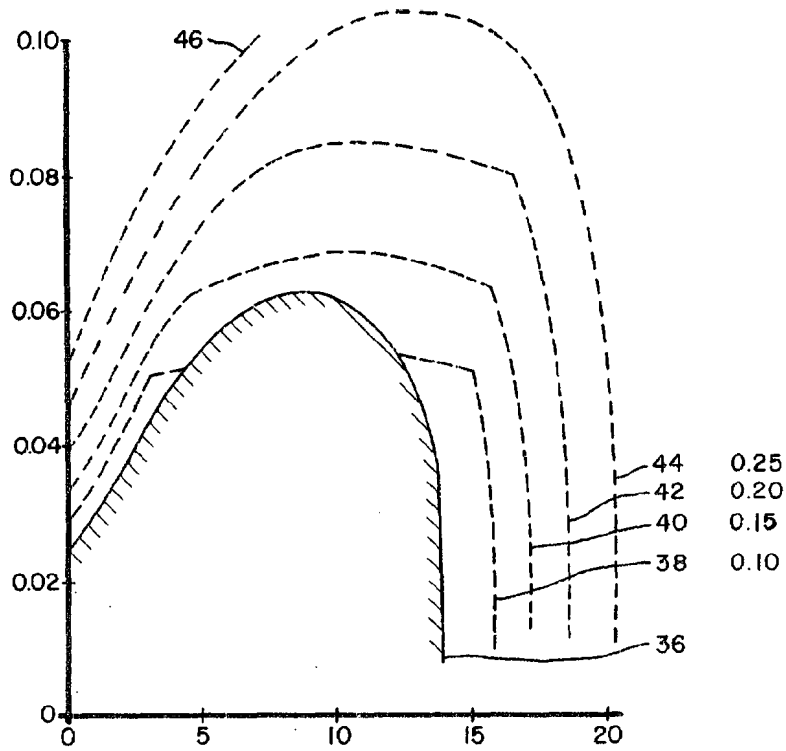
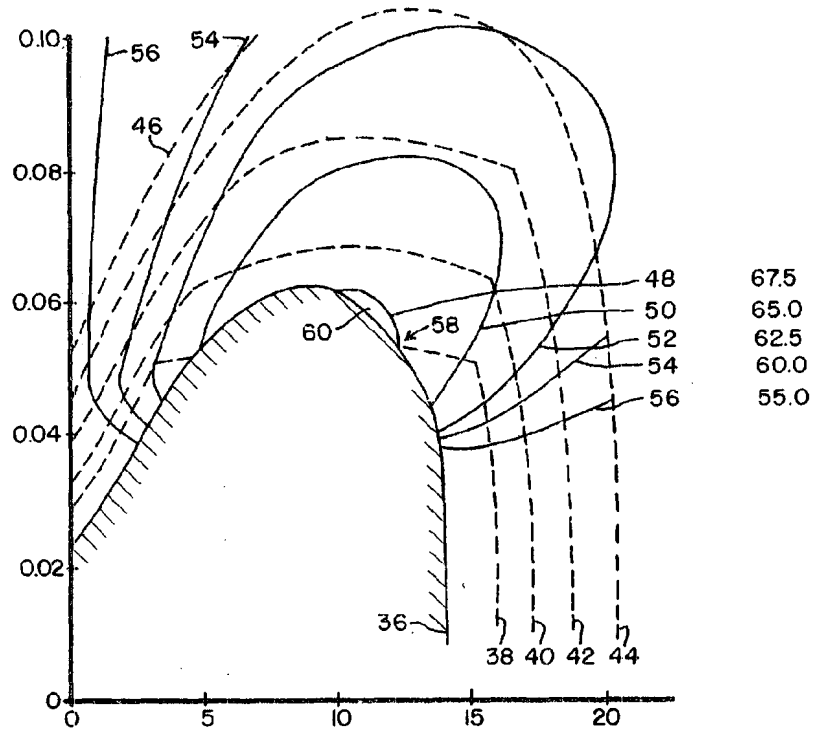


Fig. 5.



Madrid, 25 JUN 1955

UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION

P. P.

[Handwritten signature]

Escala variable



Fig. 6.

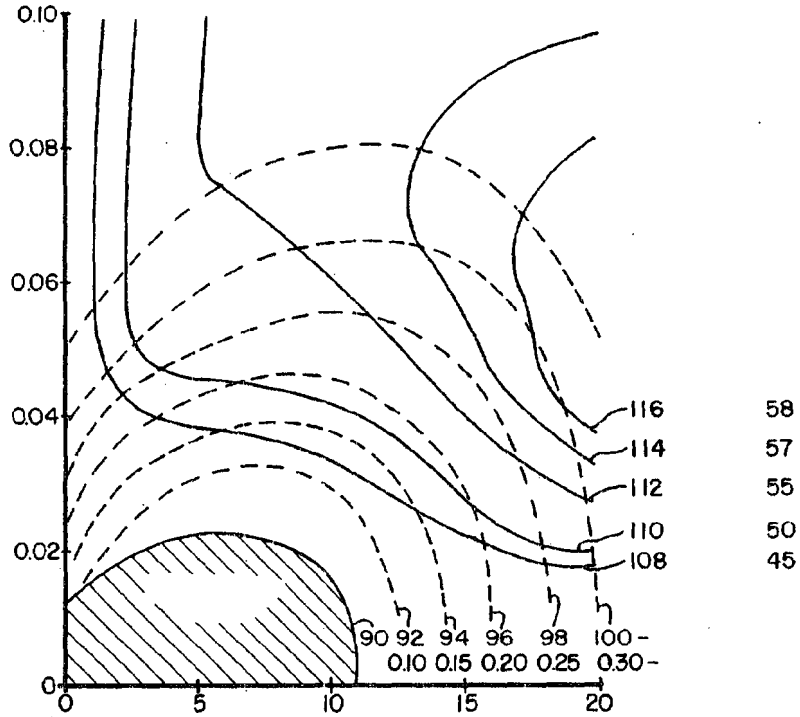
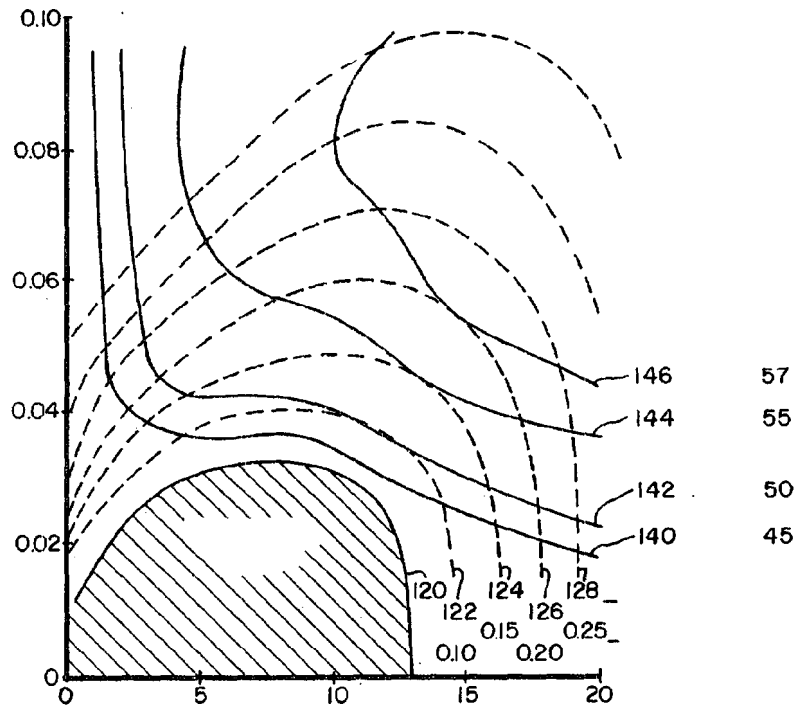


Fig. 7.



Madrid, 25 JUN. 1950

UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION
P. P.

Escala variable

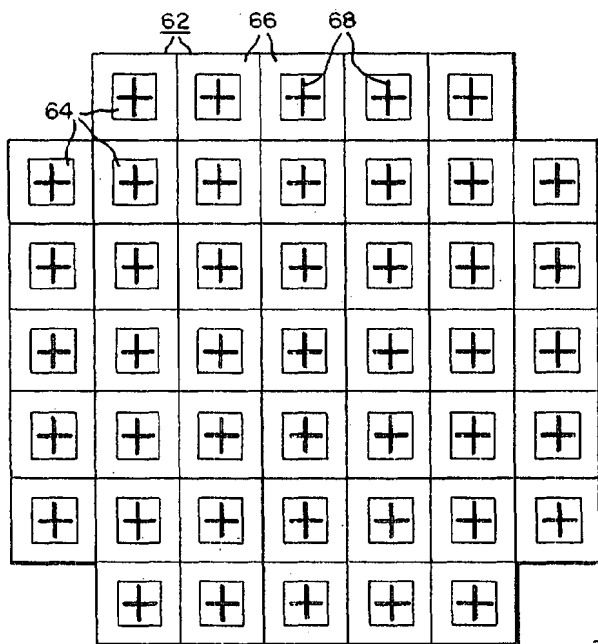


Fig. 8.

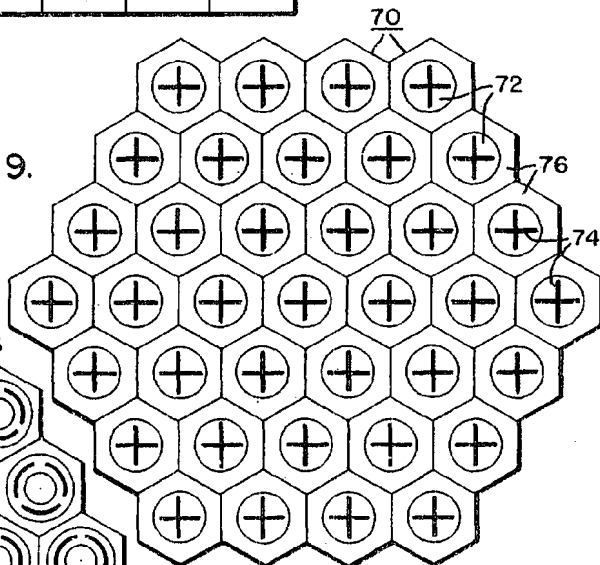


Fig. 9.

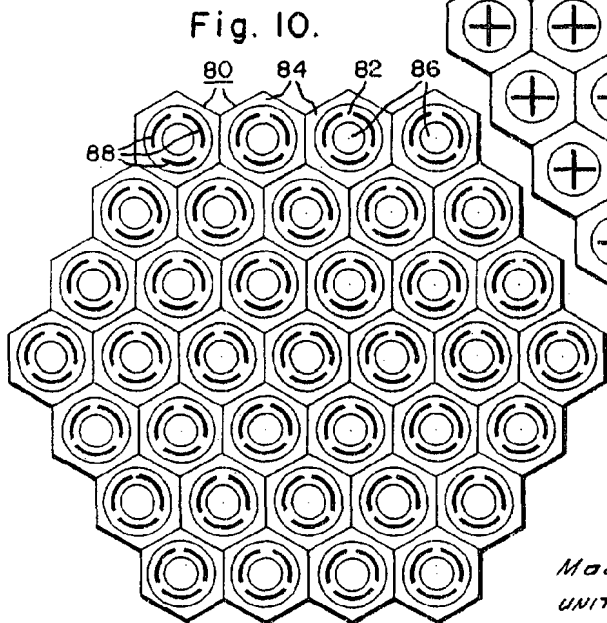


Fig. 10.

Madrid, 25 JUN. 1965
UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION

P. P. *[Signature]*

Escala variable