

PRIMER EJERCICIO

GRUPO B - FÍSICA Y TECNOLOGÍA NUCLEARES

TEMA 9: Reactores nucleares. Componentes. Tipos.

INDICE

1. RESUMEN
2. COMPONENTES
 - 2.1. COMBUSTIBLE
 - 2.2. MODERADOR
 - 2.3. REFRIGERANTE
 - 2.4. ELEMENTOS DE CONTROL
 - 2.5. ELEMENTOS ESTRUCTURALES
3. TIPOS DE REACTORES
 - 3.1. REACTORES DE AGUA A PRESIÓN (PRESSURIZED WATER REACTOR)
 - 3.2. REACTORES DE AGUA EN EBULLICIÓN (BOILING WATER REACTOR BWR)
 - 3.3. REACTOR REFRIGERADO POR GAS
 - 3.4. REACTORES DE AGUA LIJERA AVANZADOS (ALWR)
 - 3.5. REACTORES DE GENERACIÓN IV
 - 3.6. REACTORES EXPERIMENTALES
4. BIBLIOGRAFÍA
5. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE TEMARIO

4. BIBLIOGRAFÍA

- Nuclear Systems. N.E. Todreas y MS Kazimi. Taylor and Francis. 1990
- Nuclear Reactor Engineering. S. Glasstone y A. Sesonske. Chapman and Hall. 1994.
- <http://www.gen-4.org>

5. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE TEMARIO

Este tema tiene relación directa con los siguientes temas de temario:

1. B-11 “Centrales nucleares de agua ligera tipo PWR. Características, análisis de las mismas”
2. B-12 “Centrales nucleares de agua ligera tipo BWR. Características, análisis de las mismas”
3. B-14 “Componentes de centrales nucleares de agua ligera. Diseño mecánico. Análisis de tensiones. Análisis de fatiga. La vasija a presión del reactor, seguimiento de propiedades mecánicas. Formación y crecimiento de grietas. Mecánica de la fractura”

1.-RESUMEN

Un reactor nuclear se define básicamente como una instalación en la que se ha reunido y estructurado convenientemente suficiente material fisionable para iniciar, controlar y mantener de modo estable una reacción en cadena de fisión, extrayendo el calor que se genera en este proceso y produciendo los productos de fisión correspondientes.

El calor generado en un reactor nuclear se transfiere a un fluido de trabajo, y desde esta etapa en adelante las centrales de energía nuclear y las plantas convencionales de energía de combustibles fósiles son esencialmente semejantes.

Existe gran variedad de reactores nucleares en cuanto a su diseño y componentes. Sin embargo todos constan de cinco componentes básicos.

2.- COMPONENTES

2.1. Combustible

Es el material que sufre el proceso de fisión, y que se utiliza simultáneamente como fuente de energía y fuente de neutrones para mantener la reacción en cadena.

Se presenta en dos estados:

- a) Sólido, en forma metálica o de óxido con diversas configuraciones como placas, varillas, pastillas, normalmente encapsuladas dentro de otros metales o aleaciones.
- b) Fluido, mezclado con el moderador y refrigerante en forma de solución, suspensión o sales fluidas.

La disposición del combustible se llama núcleo.

El combustible en estado sólido (lo más normal) debe protegerse de la evasión y corrosión que sufre durante el funcionamiento del reactor. Para ello se encapsula en vainas de metal de alta hermeticidad de diferentes tipos y formas, lo que además proporciona protección contra la dispersión de los productos de fisión. Estas vainas pueden ser de magnesio, acero inoxidable o zircalloy. Además en algunos tipos de reactores varias unidades de combustible se agrupan en elementos combustibles, que a su vez se distribuyen en función del tipo de reactor.

Los materiales más utilizados como combustible son:

- a) Uranio metálico. Alta densidad de material fisionable, alta conductividad, mala estabilidad dimensional.
- b) Aleaciones de uranio. Menor densidad.

- c) UO₂ cerámico. Elevada retención de los productos de fisión y alto punto de fusión. Es el más usado en reactores comerciales
- d) Óxidos mixtos de uranio y plutonio. Propiedades semejantes a los anteriores, y permiten quemar el plutonio producido en las reacciones que se producen en los reactores de uranio. Mayores problemas de fabricación y uso por las propiedades nucleares y tóxicas del plutonio.

Son requisitos deseables para el combustible:

- Propiedades nucleares adecuadas para el mantenimiento de una reacción nuclear en cadena controlable. Alta densidad de material fisionable.
- Estabilidad dimensional frente a la temperatura, la presión y el quemado.
- Resistencia mecánica y a la fluencia.
- Buenas propiedades térmicas: punto de fusión elevado y elevada conductividad térmica.

2.2. Moderador

Si el combustible nuclear es U²³⁵, la sección eficaz máxima para reacciones de fisión se produce cuando la energía del neutrón incidente es del orden de 0.025eV. Como la energía de los neutrones resultantes del proceso de fisión es mucho más elevada (aprox. 2 MeV) se necesita introducir un componente para reducir la alta energía de los neutrones de fisión.

En función de su energía los neutrones pueden clasificarse en tres grupos:

Rápidos. $E > 100 \text{ KeV}$

Intermedios. $1 \text{ eV} < E < 100 \text{ KeV}$

Térmicos. $E < 1 \text{ eV}$

En el grupo rápido el proceso de moderación consiste en provocar choques elásticos entre los neutrones y los átomos del moderador. La pérdida de energía es mayor cuanto más parecidas sean las masas de los núcleos que colisionan. Así en este caso los mejores moderadores serán los elementos más ligeros. Además los neutrones rápidos sufrirán procesos de dispersión inelástica y de absorción total, que es el proceso básico de generación de material fisionable a partir de material fértil.

En el grupo intermedio son importantes las reacciones de absorción en especial en la zona de resonancia.

En el grupo térmico, además de las fisiones, pueden producirse absorciones térmicas en el combustible y en otros materiales.

Por tanto las condiciones de un buen moderador serán:

- Alta sección eficaz de dispersión
- Baja sección eficaz de absorción.
- Peso atómico bajo.

- Otros factores no nucleares, como:
 - a) Facilidad de mecanización (si es sólido)
 - b) Disponibilidad (precio, en definitiva)
 - c) Estabilidad frente a la temperatura y la radiación, y resistencia a la corrosión.
 - d) Buenas propiedades de transmisión del calor.

En la práctica se utilizan elementos como H, He, Li, Be, C, O, en materiales como:

1. Agua pesada (D₂O, se sustituyen los átomos de hidrógeno, por dos átomos de deuterio, isótopo del hidrogeno con un neutrón adicional en el núcleo atómico). Es el mejor moderador, pero resulta muy caro.
2. Be, óxido de Be. Muy bueno, pero tóxico y caro.
3. Grafito. De peores propiedades moderadoras, pero barato y térmicamente estable.
4. Agua. Barato y utilizable además como refrigerante. Tiene como inconvenientes su elevada sección eficaz de absorción, lo que requiere enriquecimiento del uranio, y que se descompone por radiólisis.
5. Parafinas e hidrocarburos. Buenos moderadores, pero inestables frente a las radiaciones.

2.3. Refrigerante

El calor producido en el núcleo debe extraerse por dos razones, una prevenir el daño estructural al núcleo y otra para utilizar la energía generada para producir electricidad.

La función esencial del refrigerante es extraer ese calor. Por ello debe tener gran fluidez a la temperatura de operación del reactor, lo que hace pensar en gases y líquidos.

Los requisitos de un buen refrigerante son:

- Baja absorción de neutrones.
- Baja radiactividad inducida.
- Gran estabilidad frente a una disociación por calor, radiación o bombardeo neutrónico. Además los productos resultantes de la radiactividad inducida deben ser estables o de vida corta para que sea fácil manejar el refrigerante fuera del reactor.
- Desde el punto de vista térmico, alta conductividad térmica y elevado punto de ebullición.

Hasta ahora se han utilizado como refrigerantes:

1. Agua.

Buena transmisión del calor, con propiedades físicas y químicas muy bien estudiadas. Baja viscosidad (fácil bombeo). No presenta grandes problemas de corrosión, es barata y abundante.

Entre sus desventajas: necesita como combustible uranio algo enriquecido, activación del oxígeno con emisión de rayos gamma de alta energía y bajo período, activación de impurezas, lo que requiere un tratamiento de purificación, aunque su principal desventaja es su bajo punto de ebullición, lo que requiere mantener el ciclo del refrigerante a presiones muy altas. Esta limitación repercute en una eficacia térmica (relación entre la potencia eléctrica producida y la potencia calorífica generada) del 30 al 35%, ya que ésta aumenta con la mayor temperatura del fluido de trabajo.

2. Agua pesada

Tiene esencialmente las mismas propiedades físicas y químicas que el agua ligera, con mejores propiedades de moderación. Permite usar uranio natural, pero es muy cara.

3. Gases

Pobre transferencia de calor, a menos que se trabaje a presiones muy altas con las consiguientes dificultades de operación. Se usan H, He y dióxido de carbono.

El hidrógeno es el mejor extractor de calor y moderador, pero su alto riesgo de explosión lo hace inservible.

El helio es un buen refrigerante, inerte, estable a altas temperaturas y no se activa, y por ello se ha empleado en los reactores HTGR (ver más abajo). El problema es su escasa disponibilidad.

El CO₂ es aceptable como refrigerante barato y fácil de conseguir, pero su transmisión del calor es baja y requiere altas presiones de operación. Es radiactivamente estable e inerte a la temperatura de operación, pero a temperaturas más altas reacciona con el grafito que le acompaña como moderador produciendo CO.

4. Metales líquidos

El mercurio y el galio tienen buenas propiedades térmicas, pero el mercurio tiene una alta sección eficaz de absorción y el galio es muy corrosivo.

5. Metales alcalinos fundidos

El sodio es buen transmisor del calor, tiene baja sección eficaz de absorción y no es corrosivo si se mantiene baja la concentración de oxígeno. Su gran desventaja es que reacciona violentamente con el agua, lo que complica el diseño de los intercambiadores de calor, y además presenta la activación de los isótopos Na-22 y Na-24.

El litio tiene mejores características térmicas y neutrónicas que el sodio, pero la alta sección eficaz del Li-6 obligaría a su eliminación con el consiguiente coste.

6. Sales inorgánicas fundidas

Se han ensayado y desechado su uso por su inherente naturaleza corrosiva.

7. Fluidos orgánicos. Difenilos

Tienen buenas características térmicas y nucleares, estabilidad térmica y fácil manejo. Se ha desistido de su uso por su alta inestabilidad frente a la

irradiación neutrónica, los productos de su descomposición depositan en las placas del combustible, perjudicando la transmisión del calor.

2.4. Elementos de control

El control del reactor se consigue interfiriendo en la economía neutrónica para cambiar el factor de multiplicación efectivo. Para ello se emplean materiales absorbentes de neutrones combinados con el moderador o se modifican las características de fugas del reactor.

El método más extendido es el de la absorción parasitaria. Se emplea boro, cadmio, plata, indio en forma de barras que se pueden insertar aumentando o disminuyendo el factor de multiplicación; o bien añadir al refrigerante un soluto absorbente.

Otro es el método de la fuga, que se utiliza en reactores de moderador líquido ajustando el nivel del moderador en el núcleo (cuando baja el nivel las fugas aumentan).

Otro mecanismo de control es la presencia de material fértil o “blanket”. El U235 es el único isótopo natural fisiónable y su proporción en el uranio natural es del 0.7%. Como el uranio natural es relativamente abundante se ha considerado de interés obtener otros isótopos fisiónables como Pu-239 y U-233, que se originan a partir de U-238 y Th-232 respectivamente, materiales fértiles que se disponen convenientemente en algunos tipos de reactores. Los reactores que producen más material fisiónable del que consumen se llaman reproductores. El material fértil se mezcla con el combustible por todo el núcleo o en capas en una zona exterior, que además puede servir de reflector.

Colocar un reflector alrededor del núcleo es un método para disminuir la fuga neutrónica. El reflector refleja los neutrones que escaparían del núcleo y los devuelve a su interior. Debe tratarse de un material con alta sección eficaz de dispersión. Los buenos moderadores como grafito, berilio, agua ligera, etc. son también buenos reflectores. La importancia del reflector radica además en que al reducir las pérdidas se permite que el núcleo sea crítico con un tamaño menor. Además mejora la potencia media que se extrae del reactor, pues incrementa el flujo neutrónico en las zonas exteriores al núcleo. Otra ventaja es que disminuye la irradiación neutrónica sobre la vasija que contiene el núcleo, por lo que el daño por irradiación es menor.

2.5. Elementos estructurales

Son aquellos componentes, soportes, columnas, guías, elementos de fijación, etc. que proporcionan al núcleo su configuración adecuada. Su función es variada: revestimiento del combustible, dirección del refrigerante, etc.

Los requisitos para los materiales empleados son:

- Propiedades nucleares, tales como baja sección eficaz de absorción y baja radiactividad inducida.

- Resistencia mecánica y a la corrosión, estabilidad frente a la radiación y a la temperatura.
- Buenas propiedades térmicas, tales como elevado punto de fusión y alta conductividad.
- Fácil mecanización: forja y soldadura.

3.- TIPOS DE REACTORES

Hay cientos de combinaciones de combustible, moderador, refrigerante, etc. pero sólo algunos se han utilizado o se prevé que se usen en el próximo futuro:

- a) para la producción de energía
- b) nuevos diseños comerciales
- c) propulsión naval (submarinos o barcos)
- d) experimentales
- e) generación IV

Se exponen a continuación los tipos más comunes.

3.1. Reactores de agua a presión (Pressurized Water Reactor PWR)

El combustible es dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido en el isótopo U235 (hasta el 5% en peso). El moderador y refrigerante es agua ligera a una presión algo inferior a unos 160 Kg/cm² para evitar la ebullición. El calor se transfiere del sistema primario (donde se encuentra el núcleo y el reactor) al secundario mediante un cambiador de calor (generador de vapor), y por tanto genera vapor en el sistema secundario. El vapor producido en el generador de vapor, está a menor presión y temperatura que el refrigerante primario. En consecuencia, la parte secundaria del ciclo es semejante a la de una planta de combustibles fósiles de presión moderada.

La alta presión y temperatura en grandes caudales presenta problemas de erosión y corrosión. Las altas densidades de energía logradas con el combustible permiten núcleos muy compactos. La alta presión exige una vasija muy costosa y a prueba de fugas. También son importantes los requisitos sobre la contención.

Es el tipo de reactor más extendido actualmente para producción de energía.

Los reactores de propulsión naval son modificaciones de PWR's, más compactas.

Un tipo especial de reactor de este tipo es el denominado CANDU, de diseño canadiense, que utiliza UO₂ sin enriquecer como combustible y dos sistemas separados con agua pesada como moderador y refrigerante. Los tubos con combustible son horizontales, lo que facilita las recargas. Las barras de control son verticales. Todo el reactor está encerrado en una vasija a presión llamada calandria. El sistema en conjunto trabaja como un PWR.

3.2. Reactores de agua en ebullición (Boiling Water Reactor BWR)

El sistema nuclear de reactor de agua en ebullición de ciclo directo, es un sistema generador de vapor consistente en un núcleo y en una estructura interna ensamblados dentro de un recipiente a presión (vasija), en sistemas auxiliares para satisfacer los requisitos operacionales y de seguridad del reactor nuclear, y en la instrumentación y control necesarios.

El combustible es dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido (2-4%). Utilizan agua ligera como refrigerante y moderador, pero se permite la ebullición en la propia vasija. La presión de operación es de unos 70 Kg/cm². La presión y temperatura del vapor son similares en toda la vasija. La eliminación de un circuito intermedio simplifica el diseño de la parte convencional (vapor conducido directamente a turbina-condensador). También la formación de huecos en caso de una excursión de potencia confiere a este reactor una importante característica de seguridad intrínseca, aunque aparecen otros problemas asociados a inestabilidades acopladas neutrónicas y termohidráulicas.

El vapor proveniente del reactor de agua en ebullición es, por supuesto, radiactivo. La radiactividad es principalmente N-16, un isótopo de vida muy corta (7 segundos de vida media), de manera que la radiactividad del sistema de vapor sólo existe durante la generación de potencia. El arrastre de partículas radiactivas de vida larga del sistema primario al sistema turbina/agua de alimentación virtualmente no existe. Ello permite realizar el mantenimiento de los sistemas de condensado y agua de alimentación, y turbina-generator en una parada de forma prácticamente similar a las plantas operadas con combustibles fósiles.

Es el segundo tipo de reactor más empleado.

3.3. Reactor refrigerado por gas

Utiliza uranio natural metálico como combustible y grafito como moderador y CO₂ como refrigerante, opera a presiones moderadas y temperaturas relativamente altas. Un circuito secundario de agua produce vapor a alta y baja presión. Los requisitos de contención son moderados y mínimos los problemas de corrosión. El núcleo es grande y baja la densidad de potencia, la recarga de combustible es continua. Las pobres características del CO₂ como transmisor de calor requieren un alto bombeo, a cambio es barato, seguro y fácil de manejar.

Los reactores de gas avanzados utilizan como combustible UO₂ de bajo enriquecimiento (1%). El núcleo es menor y mayor su eficiencia.

3.4. Reactores de agua ligera avanzados (ALWR)

Basados en los diseños de los PWR Y BWR construidos durante los años 1975-1990 (denominados generación III), su principal característica, y lo que los diferencia de ellos, es que sustituyen el enfoque de los sistemas de seguridad, de modo que en vez de dotarlos de sistemas múltiples y diversos de alimentación eléctrica, optan por lo que se denomina sistemas pasivos, en los que se utilizan principios físicos como la fuerza de gravedad o la circulación natural para refrigerar el primario y la contención, de modo que se obtiene un grado mucho mayor de seguridad intrínseca.

Son los reactores que se están construyendo o encargando en la actualidad, para entrar en servicio a lo largo de la década 2010-2020. Son los llamados generación III+.

Dentro de este apartado cabe destacar los diseños PWR denominados EPR (AREVA, franco-alemán) y AP1000 (Westinghouse, estadounidense), y el diseño BWR denominado ESBWR (General Electric, estadounidense).

3.5. Reactores de Generación IV

Consiste en una serie de nuevos proyectos (algunos basados en tecnologías que se habían ensayado con anterioridad), cuya introducción comercial se espera que tenga lugar a partir de 2030.

Su enfoque genérico apunta a reactores más seguros, con menos residuos (reciclado de plutonio y resto de actínidos), mayores temperaturas de operación (lo que proporciona mejores rendimientos y posibilidad de nuevos usos como la producción de hidrógeno).

Algunos de los sistemas que se están estudiando son los siguientes:

3.5.1. Reactor de gas de muy alta temperatura (High Temperature Gas-cooled Reactor HTGR)

El combustible es uranio altamente enriquecido (20%). Se utiliza grafito como moderador y helio (siempre permanece en fase gaseosa) como refrigerante para producir vapor en un circuito secundario o alimentar directamente a la turbina. Se consigue alta eficiencia (aprox. 39%) con temperaturas relativamente bajas del gas (760 °C), aunque el objetivo es alcanzar los 1000°C. Es posible un alto grado de quemado y la conversión de material fértil en combustible. Los problemas de corrosión son mínimos por el gas inerte.

En el caso de ciclo directo puede contaminarse la turbina, si falla el combustible. El diseño de elementos combustibles para una vida larga se complica con la alta temperatura de operación. Por otra parte la disponibilidad del helio es escasa.

3.5.2. Reactor reproductor rápido de metal líquido (Liquid Metal Fast Breeder Reactor LMFBR)

El combustible es uranio altamente enriquecido (15-20%). No utiliza moderador. Emplea sodio como refrigerante y, a través de un circuito intermedio también de sodio, se transfiere el calor a un circuito generador de calor.

El reactor regenerador rápido deriva su nombre de su capacidad para regenerar, esto es, para crear más material fisionable del que consume, y del hecho de que el flujo de neutrones contiene mayor cantidad de neutrones rápidos que térmicos.

Los neutrones que escapan de la zona físil inciden en la zona fértil de U-238, que actúa para producir Pu-239. Se diseña para producir más fisionable del que consume. El flujo rápido es poco absorbido, esto facilita la elección de materiales estructurales. La baja absorción de neutrones por los productos de fisión permite un alto grado de frenado.

3.5.3. Otros Generación IV

Otros reactores que se están desarrollando son los refrigerados por plomo líquido, los de sales fundidas, refrigerados por agua supercrítica (temperatura mayor de 374°C y presión superior a 22.1 MPa).

3.6. Reactores experimentales

Utilizados para experimentar con materiales o como fuentes neutrónicas de alta densidad. Existe una multitud de ellos con diseños dependientes de la aplicación concreta. Muchos de ellos se basan en un pequeño reactor nuclear base, de tipo piscina (refrigerado por circulación natural, y a presión y temperatura ambiente), al que se pueden acoplar distintas capsulas experimentales, para simular distintas condiciones experimentales de presión, temperatura o radiación.

Entre estos cabe destacar el reactor de Halden (OCDE, Noruega), varios en Francia (Osiris, Cabri, Jules Hortowitz, este último en construcción), y en Japón (NSRR, JMRT)