

Grupo B Tema 6.

Combustibles nucleares. Tipos.
Propiedades. Diseño. Materiales.
Evolución isotópica. Quemado.

INDICE.

- 1.- RESUMEN EJECUTIVO.
- 2.- BIBLIOGRAFIA.
- 3.- RELACION CON OTROS TEMAS.
- 4.- DESARROLLO DEL TEMA.
- 4.1.- INTRODUCCION.
- 4.2.- TIPOS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR.
- 4.3.- PROPIEDADES.
- 4.4.- DISEÑO.
- 4.4.1- Aspectos de seguridad nuclear
- 4.4.2- Requisitos funcionales del conjunto combustible.
- 4.5.- MATERIALES.
- 4.5.1.- Uranio Metálico.
- 4.5.2.- Dióxido de uranio.
- 4.5.3.- Plutonio.
- 4.5.4.- Materiales de vaina y estructurales.
- 4.5.- EVOLUCION ISOTOPICA.
- 4.6.- QUEMADO.

1.- RESUMEN EJECUTIVO.

Combustibles nucleares, CN, son las sustancias que pueden producir energía por un proceso de fisión nuclear, de acuerdo con el texto actual de la Ley de Energía Nuclear, aunque también se podrían considerar así los que se usan en procesos de fusión, de los que no nos ocuparemos en este tema. Los combustibles nucleares usados actualmente son de uranio natural, de uranio ligeramente enriquecido (los más comunes), de uranio altamente enriquecido, o una mezcla de uranio y plutonio ligeramente enriquecidos. La inmensa mayoría de los combustibles nucleares utilizan el isótopo físil U^{235} . Las propiedades más importantes de los CN son la generación de calor por un proceso exotérmico de fisión nuclear por absorción de neutrones, la transmisión de calor, la resistencia a la irradiación, la estabilidad química y el precio. El diseño del CN debe por tanto atender a cuestiones de diseño nuclear, termohidráulico, termomecánico y mecánico. El material más común para el CN es el dióxido de uranio UO_2 . Es un material cerámico de alta densidad, químicamente estable, con muy baja conductividad térmica y un altísimo punto de fusión. Se fabrica a partir del hexafluoruro de uranio por vía seca o por vía húmeda. El plutonio está menos extendido, aunque tiene una importancia creciente ya que se obtiene a partir de combustible irradiado y su utilización, mezclado con uranio, reduce la cantidad de residuos obtenidos por unidad de energía producida. La evolución isotópica del CN en el reactor determina que ocurra pérdida de materiales físis, generación de productos de fisión altamente radiactivos, alguno de los cuales actúa como venenos neutrónicos, de transuránidos y de productos de activación en los materiales estructurales. El quemado del CN es una medida de la cantidad de energía extraída del combustible por unidad de masa.

2.- BIBLIOGRAFIA.

- Ingeniería de Reactores Nucleares. Glasston - Sensoke. Editorial Reverté.
- El Ciclo del combustible nuclear. Sociedad Nuclear Española. 1997.
- The nuclear fuel of pressurized water reactors and fase neutron reactors. CEA. Lavoisier Publishing. 1999.

3.- RELACION CON OTROS TEMAS.

El presente tema está relacionado con los siguientes:

- Con el B-3 del 1^{er} ejercicio “*Neutrones. Interacción con la materia ...*”, por ser el elemento combustible donde se generan los neutrones.
- Con del B-4 del 1^{er} ejercicio, “*Minería del uranio. Producción de concentrados. Enriquecimiento isotópico, métodos*”, por ser el uranio el principal constituyente del combustible nuclear.
- Con el B-7 del 1^{er} ejercicio, “*Tratamiento de combustibles irradiados...*” por que viene a ser una continuación del presente tema.
- Con el A-10 del 2^o ejercicio, “*Teorías de la difusión y del transporte neutrónico ...*”, por tratar de cuestiones afines.
- Con el A-33 del 2^o ejercicio, “*Gestión del combustible irradiado ...*”, por que también es una continuación del presente.

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

4.- DESARROLLO DEL TEMA.

4.1.- INTRODUCCION.

Combustibles nucleares son, de acuerdo con la definición recogida en la Ley 25/1964 de Energía Nuclear, las sustancias que pueden producir energía por un proceso de fisión nuclear.

Lógicamente, no existe reacción de combustión en sentido químico, pero por analogía con los combustibles se le ha dado esta denominación en atención al hecho de que son materiales que se consumen durante la operación de los reactores nucleares y es necesario sustituirlos.

Todo combustible nuclear debe contener alguna de las especies físiles U^{233} , U^{235} , Pu^{239} o Pu^{241} .

Los materiales que se utilizan para la fabricación de elementos combustibles pertenecen a una de estas dos categorías: materiales combustibles propiamente dichos y materiales de envainado y estructurales.

4.2.- TIPOS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR.

En función del grado de enriquecimiento podemos clasificar los combustibles nucleares en tres tipos:

1. Combustibles de uranio natural. Usados en reactores moderados por grafito o agua pesada. En estos combustibles no se pueden alcanzar altos grados de quemado y requieren frecuente sustitución.
2. Combustibles ligeramente enriquecidos en especies físiles de uranio o de una mezcla de uranio y plutonio. Usados en reactores moderados por agua ligera. Se pueden alcanzar grados de quemado de interés económico para las centrales nucleares, teniendo en cuenta su coste. Son los utilizados en las centrales PWR y BWR en operación en España. Tienen un enriquecimiento menor del 5%, aunque actualmente se está muy cerca de este límite.
3. Combustibles de uranio altamente enriquecido. Utilizados en reactores de investigación y de propulsión naval. Suelen tener enriquecimientos del 20 al 90%.

En función del isótopo físil usado, podemos establecer la siguiente clasificación.

1. Combustible con U^{235} . Es el más usado en la actualidad. El isótopo se da en la naturaleza en una proporción del 0.7%. Al proceso de aumentar esta proporción (o la de cualquier otra especie físil) se le denomina enriquecimiento. Es un proceso muy costoso en energía.
2. Combustible con U^{233} . Hasta ahora no se ha desarrollado comercialmente.
3. Combustible con Pu: normalmente se trata de óxidos mixtos U-Pu con enriquecimiento equivalente al 5% en U^{235} . Se usan en algunos reactores de

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

agua ligera, y está aumentando su uso sobre todo en Europa y Asia, ya que el plutonio se obtiene del reprocesado del combustible previamente irradiado, por lo que se minimiza la cantidad de residuos. Por otra parte, en trabajo con plutonio presenta nuevos problemas de toxicidad, protección radiológica y de falta de homogeneidad con el óxido de uranio, que deben ser tratados específicamente.

4. Combustible con torio: son diseños experimentales, basados en la conversión del torio en material fisible por absorción neutrónica.

4.3.- PROPIEDADES.

Nos referimos en este apartado al combustible propiamente dicho. Para que un material combustible resulte satisfactorio ha de reunir las siguientes características:

1. Capacidad de mantener una reacción en cadena controlada, lo cual comporta necesidades de diseño a la disposición geométrica del combustible, necesidades de moderador neutrónico o materiales estructurales con propiedades determinadas de captura neutrónica.
2. Sus propiedades de transmisión de calor deben ser tales que permitan la obtención en el reactor de altas densidades de potencia (Kilovatios por litro de volumen del núcleo) y de altas potencias específicas (Kilovatios por kilogramo de combustible). Es conveniente pues, una conductividad térmica elevada, para reducir los gradientes de temperatura.
3. El material debe ser muy resistente al deterioro por irradiación. El costo de combustible de un reactor de potencia depende en gran medida del grado de enriquecimiento. La vida del elemento combustible en el reactor debería de ir determinada por consideraciones de criticidad y no por efectos de irradiación.
4. El material combustible debe ser químicamente estable, sobre todo con respecto a los materiales de vaina y al refrigerante, de modo que no llegue a producirse interacción, o muy poca, en caso de rotura de la vaina.
5. Las propiedades físicas y mecánicas del material deben permitir una fabricación económica de los elementos combustibles.

4.4.- DISEÑO.

La tecnología precisa para el diseño y validación del combustible nuclear comprende un conjunto de disciplinas que habitualmente se agrupan conforme al siguiente esquema:

- Diseño nuclear, que atiende a los aspectos básicos de la generación, mantenimiento y control de las reacciones neutrónicas.
- Diseño termomecánico de la barra combustible, cuya finalidad es asegurar el debido confinamiento de los productos de fisión y del combustible dentro de la vaina, que puede ser considerada como primera barrera (en ocasiones se dice que la primera barrera es el mismo combustible, queriendo significar que su diseño debe ser tal que mantenga su integridad, no dispersándose o emitiendo demasiados productos de fisión. Lo normal es considerar la primera

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

barrera la vaina, ya que el combustible no siempre cumple completamente lo requerido para considerarse barrera).

- Diseño mecánico del conjunto combustible, que tiene por objeto elaborar la configuración material portadora del combustible dentro del ambiente del reactor, especificado por la temperatura, presión, campos de fuerzas debidas a los flujos de masas presentes, y a la radiación.
- Diseño termohidráulico, que estudia los mecanismos de transmisión y extracción de la energía producida desde el combustible como tal al refrigerante.

El diseño del combustible nuclear puede hacerse a dos niveles:

1. diseño inicial del reactor, donde se estudia fundamentalmente las características esenciales, neutrónicas, térmicas, termohidráulicas y de seguridad del sistema nuclear de generación de energía,
2. diseño nuclear de recargas. En este último aspecto, se estudia la configuración del núcleo en cada ciclo de operación (separados por las consiguientes recargas de elementos combustibles), con un esquema particular de recarga, una estrategia de introducción de elementos nuevos y de extracción y reubicación de elementos usados, parcial o totalmente (barajado). El fin es obtener un número de días equivalentes a plena potencia, DEPP, que satisfaga los requerimientos económicos del ciclo de la central, teniendo en cuenta los costes de enriquecimiento, fabricación e ingeniería, y por su puesto de seguridad.

4.4.1 Aspectos de seguridad nuclear

Durante todas estas fases de diseño, se introducen determinados criterios de seguridad nuclear, encaminados a conseguir las tres funciones fundamentales de seguridad:

1. Control de la criticidad
2. Extracción del calor generado
3. Confinamiento de los materiales radiactivos y control de dosis.

El diseño del combustible nuclear tiene como finalidad demostrar, desde el punto de vista de la seguridad nuclear, que:

- a) La refrigerabilidad del núcleo del reactor y la inserción de barras de control está garantizada en toda circunstancia, incluso a pesar de los posibles daños que sufra el conjunto combustible tras una condición de accidente de diseño.
- b) El conjunto combustible no experimenta daño alguno operando en condiciones normales, o bajo incidentes o transitorios operacionales.

4.4.2.- Requisitos funcionales del conjunto combustible.

Por todo lo anterior se requiere elaborar un conjunto completo de criterios y bases de

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

diseño; establecer todos los requisitos técnicos que debe cumplir el combustible como producto y definirlos de una forma tal que sea factible su fabricación industrial. Además hay que desarrollar los instrumentos adecuados para verificar la idoneidad del producto y permitir su licenciamiento. Por último, el diseño debe ser capaz de retroalimentarse con la experiencia de operación del combustible en servicio.

Refiriéndonos en concreto a combustible nuclear de dióxido de uranio ligeramente enriquecido, destinado a centrales nucleares de agua ligera tipo PWR y BWR, diremos que uno de estos elementos combustibles está compuesto por un número determinado de barras combustibles en una disposición cuadrada (aunque en algunos tipos de combustible comercial la disposición es hexagonal), unidos a lo largo de las barras por una serie de rejillas que junto con unos tubos guía y unos cabezales superior e inferior proporcionan la estructura mecánica del conjunto combustible.

En resumen, los requisitos funcionales del elemento combustible son:

- Generar la energía garantizada.
- Retener el combustible y los productos de fisión.
- Resistir condiciones ambientales
- Minimizar la captura neutrónica.
- Resistir las cargas hidráulicas y mecánicas, incluso en accidente.
- Capacidad autoportante.
- Minimizar posibles vibraciones inducidas.
- Mantener la compatibilidad con internos y con operaciones de manipulación y transporte, con otros combustibles y con instrumentación intranuclear.

A todo lo anterior hay que añadir un último requisito, al que cada vez se le da mayor importancia, consistente en la necesidad de tener en cuenta durante todas las fases de vida del combustible y el elemento nuclear la necesidad de que al final de su vida útil ha de ser tratado como un residuo radiactivo de alta actividad, lo que comporta otra serie de imposiciones.

4.5.- MATERIALES.

4.5.1.- Uranio Metálico.

El uranio metálico fue el combustible exclusivo de los primeros reactores, debido a que en esta forma proporciona el número máximo de núcleos por unidad de volumen. Sin embargo, debido a sus pobres propiedades mecánicas y su gran susceptibilidad a deterioro por irradiación, el empleo del uranio metálico ha quedado reducido drásticamente. Es el combustible usado en reactores tipo GCR, con enriquecimiento natural.

4.5.2.- Dióxido de uranio.

El dióxido de uranio es el material más utilizado, con mucho, para la fabricación de elementos combustibles de reactores de agua ligera.

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

Propiedades.

El dióxido de uranio exhibe un comportamiento típico de material cerámico. Se puede clasificar como un óxido refractario con un punto de fusión por encima de 2.800 °C. También puede incluirse en la categoría de aislante térmico, ya que es uno de los óxidos con menor conductividad térmica. El UO_2 tiene una densidad teórica de 10,96 g/cm³, comparable a la del plomo.

Estabilidad química.

Probablemente, la propiedad determinante que ha hecho que el UO_2 sea el compuesto preferido para combustible es su extraordinaria estabilidad química y comportamiento inerte. Esto con su gran estabilidad dimensional compensa con creces su baja conductividad térmica. La tendencia del UO_2 a descomponerse a altas temperaturas es mínima y su resistencia a la formación de compuestos intermetálicos le lleva a una gran compatibilidad con los materiales de envainado, aceros inoxidables y zircalloys. La estabilidad de UO_2 cuando se expone al agua a temperatura ambiente es también excelente; no se deteriora cuando falla la vaina y entra en contacto con el agua.

Conductividad térmica.

El precio que paga el UO_2 por sus propiedades de estabilidad es su baja conductividad térmica. Si no fuera por su elevado punto de fusión no se podrían obtener valores de energía de interés con UO_2 sólido. Como resultado, en la pastilla combustible se establece un fuerte gradiente de temperatura.

Fabricación.

El dióxido de uranio se produce a partir del hexafluoruro de uranio por vía húmeda o por vía seca. Los procesos por vía húmeda se basan en la hidrólisis del UF_6 y la precipitación del UO_2 de las disoluciones acuosas resultantes. En los procesos por vía seca el UF_6 es descompuesto y reducido por vapor e hidrógeno, precipitando directamente el UO_2 en polvo sólido. También puede prepararse a partir del nitrato de uranilo.

El polvo se somete a un prensado isostático y posterior sinterización, hasta una densidad mayor del 90% de la teórica, 10,96 g/cm³. Esto tiene por objeto dejar espacios para los productos de fisión gaseosos. Las dimensiones finales se ajustan por rectificado. Tras la inspección, las pastillas están listas para ser introducidas en la vaina.

4.5.3.- Plutonio.

El plutonio, excelente combustible nuclear, no puede ser utilizado en estado metálico. La metalurgia física del plutonio se complica por el hecho de que entre temperatura ambiente y su punto de fusión, 640 °C, aparecen seis formas alotrópicas.

El plutonio se utiliza en forma de dióxido, mezclado con dióxido de uranio (combustible MOX). Se debe limitar el contenido de Pu en estos óxidos mixtos, por

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

razones nucleares. La resonancia de fisión, situada a 0.3 eV de energía neutrónica, determina que ante un incremento de temperatura aumente la sección eficaz de fisión. Esto puede suponer una componente positiva del coeficiente de temperatura, que si no se compensa por otros mecanismos, puede dar lugar a que el coeficiente global de temperatura del combustible sea positivo, situación totalmente indeseable por razones de estabilidad. Así pues, la cantidad de plutonio en los óxidos mixtos debe controlarse cuidadosamente.

4.5.4.- Materiales de vaina y estructurales.

Para encerrar el combustible nuclear y dotarlo de estabilidad estructural se necesitan unos elementos específicos, con unas propiedades adecuadas al régimen de trabajo que se encuentra en los reactores nucleares. En reactores de agua ligera (los actualmente disponibles en España, el combustible nuclear se encuentra encerrado en tubos metálicos de casi cuatro metros de largo (vainas), que dispuestos en una matriz cuadrada se soportan por una estructura de tubos, rejillas y cabezales que forman el elemento combustible.

En un principio se utilizaban aceros inoxidable, por sus buenas propiedades metalúrgicas, pero debido a la alta sección eficaz de captura de neutrones térmicos del acero, en la actualidad se emplean materiales basados en el zirconio (Zr), que combina una baja sección de captura (inferior en un factor de 10 con el hierro), con una elevada temperatura de fusión.

En la actualidad debido a la tendencia a aumentar la potencia de los reactores y el tiempo de residencia de los elementos en el mismo, se trabaja activamente en el desarrollo de nuevos tipos de aleaciones de Zr, con mejores propiedades de resistencia a la corrosión, absorción de hidrógeno limitada (para evitar fragilización), y propiedades adecuadas frente a mayores irradiaciones.

4.6.- EVOLUCION ISOTOPICA.

A lo largo de la irradiación del combustible nuclear tienen lugar una serie de cambios en la composición isotópica que es necesario estudiar y tener en cuenta.

Pérdida de elementos físiles.

Es el primer e inevitable resultado de la operación. A medida que se consume, el contenido en combustible nuclear va bajando, aunque hay que tener en cuenta la producción de material físil (isótopos del plutonio, de lo que se habla más abajo)

Generación de productos de fisión.

Por cada núcleo de U-235 que haya experimentado fisión, aparecen dos núcleos de productos de fisión. Estos son fuertemente radiactivos, presentando inestabilidad beta y gamma. Pueden pertenecer a casi cualquier parte del sistema periódico, presentándose dos picos muy marcados en números másicos 70 y 140.

Generación de venenos neutrónicos.

Alguno de estos productos de fisión tienen una altísima sección eficaz de captura

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

para neutrones térmicos. Los más importantes son el xenon-135 y el samario - 149. El primero puede dar lugar a inestabilidades nucleares y a que sea dificultoso el rearranque en varios tipos de reactores. El segundo es menos importante.

Generación de transuránidos.

El resultado de la captura de un neutrón por el núclido físil no tiene por qué ser únicamente fisión. También es probable la reacción (n,γ) , para dar lugar a un isótopo. Este suele presentar inestabilidad β , que da lugar a otro elemento, un transuránido, por ejemplo actinio. Por reacción β éste da lugar a plutonio, continuando los procesos de activación neutrónica y desintegración β . Puede ocurrir que la formación de Pu-239 aumente ligeramente la reactividad, en algunas fases del ciclo. Por supuesto, el plutonio también puede experimentar fisión, contribuyendo a la generación de energía.

Generación de productos de activación.

Por reacción (n,γ) con elementos de envainado, del refrigerante, de sus impurezas y con el material de la vasija. A este respecto es importante el control de impurezas en el primario, pues su activación dificulta el mantenimiento y es una importante carga radiológica de la planta, aunque no haya fallo de vaina.

4.7.- QUEMADO.

Para expresar el grado de permanencia dentro de un reactor nuclear de combustible, se emplea el concepto de quemado. La magnitud utilizada para medirlo es la energía extraída del combustible. Su unidad es el Gigawatio-día por tonelada de uranio (GWd/TmU), o algún múltiplo. En esta unidad, los quemados suelen ser decenas.

Económicamente, interesan grados de quemado elevados, para incrementar el producto vendible de la central (energía), por unidad de producto consumido (combustible).

El primer efecto del quemado es la evolución isotópica, comentada en el apartado anterior. Sin embargo, con referencia a la vaina, se pueden presentar a altos quemados fenómenos de fragilización, plastificación, depósito de barros en la superficie (denominados en general como "cruds"), deterioro químico, que pueden hacer aconsejable la retirada del elemento combustible antes de que se alcance la condición de agotamiento del combustible nuclear. Por ello en algunos tipos de combustibles hay un límite máximo de quemado alcanzable. Este límite se suele referir al quemado medio de la barra más quemada de las que componen un elemento combustible, aunque se pueden referir también a la media de elemento (valor más bajo que el anterior) o al de la pastilla más quemada (valor más alto que el de la máxima barra).

En ocasiones, el quemado únicamente no es una buena medida del daño que ha sufrido el combustible, ya que hay que tener en cuenta cómo se ha producido la operación del mismo (potencias relativas en los distintos ciclos de operación,

Oposiciones al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

temperatura del refrigerante, ambiente químico, fluencia neutrónica, etc.). Por ello en la actualidad se manejan también otros índices que tienen en cuenta alguno de estos factores.

En las centrales de agua ligera españolas se operan con grados de quemado del orden de los 12-15 GWd/TmU por año de operación, y dentro del núcleo hay elementos con distintos quemados, dependiendo de que se hayan introducido “frescos”, es decir, por primera vez, o que sean irradiados (de más de un ciclo). Los elementos combustibles que se sacan del núcleo y que no se introducirán más ciclos de operación, tienen en la actualidad un quemado cercano a los 50 GWd/TmU, con lo que se quedan cerca de los límites actualmente aprobados.