

EL COMBUSTIBLE NUCLEAR PWR: SITUACIÓN ACTUAL Y EVOLUCIÓN PREVISTA

Jorge Aldama y Javier Riverola (ENUSA)

Introducción

El combustible nuclear que se carga actualmente en las centrales PWR proviene de la evolución del diseño a lo largo de más de 50 años. Tiene su origen en el diseño para la primera central nuclear PWR construida por Westinghouse (Shippingport, Pensilvania), que comenzó su explotación comercial en 1957. Aunque la configuración inicial se ha mantenido básicamente inalterada, ha habido cambios sustanciales en materiales y geometría para responder a problemáticas encontradas y potenciar la mejora en la economía neutrónica, eficiencia térmica y comportamiento mecánico, todo ello fruto de un esfuerzo constante de investigación y desarrollo. Los diseños actuales son altamente fiables en estado estacionario y presentan un buen comportamiento en los transitorios de diseño pero siguen evolucionando dentro de un mercado de competencia para satisfacer nuevas demandas y mejorar la respuesta frente a eventuales accidentes.

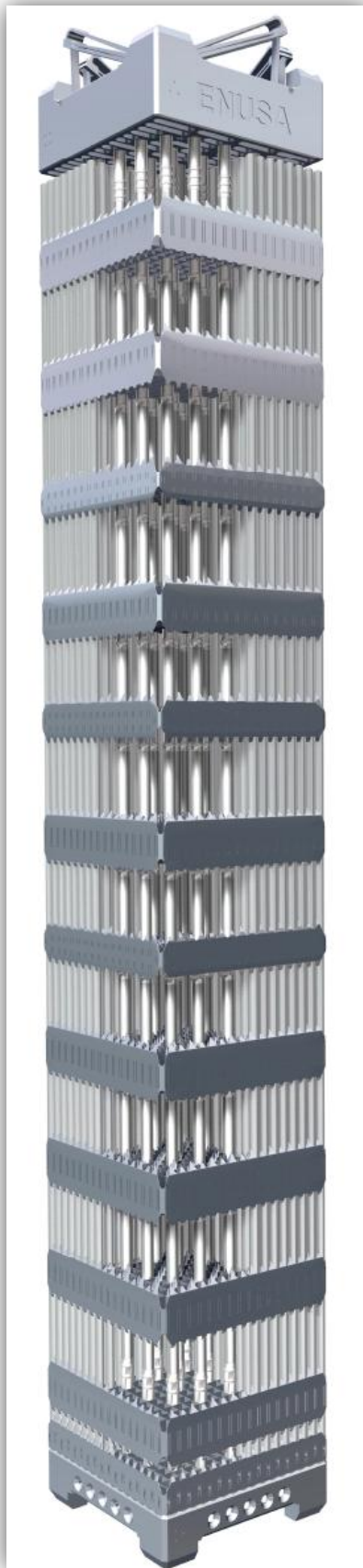
En esta nota técnica se describe la funcionalidad, materiales y características de los principales compo-

nentes del combustible MAEF (Modified Advanced European Fuel), que es el suministrado por ENUSA para las centrales nucleares españolas PWR, en su vertiente mecánica, nuclear y termohidráulica, sin entrar en consideraciones de diseño de los núcleos de recarga de un reactor.

Generalidades

Los elementos combustibles, típicamente 157 en un reactor PWR con tres lazos de refrigeración, se colocan en el núcleo con una separación mínima entre ellos. Cada elemento combustible consta de 264 varillas o barras combustibles que llevan uranio enriquecido. La estancia en el núcleo del reactor es normalmente de tres campañas – ciclos de unos 500 días de operación ininterrumpida.

El núcleo debe generar la potencia térmica prevista a través de la fisión con neutrones del uranio presente, sin que haya deterioro de las barras combustibles durante la operación normal y los transitorios operacionales, o un daño limitado en condiciones de accidentes supuestos.



Los materiales utilizados en el combustible nuclear deben presentar unas características notables, tales como una baja absorción de neutrones (en la zona activa), alta resistencia frente a la corrosión, buenas propiedades de transferencia de calor, alta resistencia mecánica y ductilidad en condiciones de irradiación y postirradiación, alta estabilidad térmica (resistencia al calor en condiciones accidentales), bajo nivel de activación neutrónica,...etc.

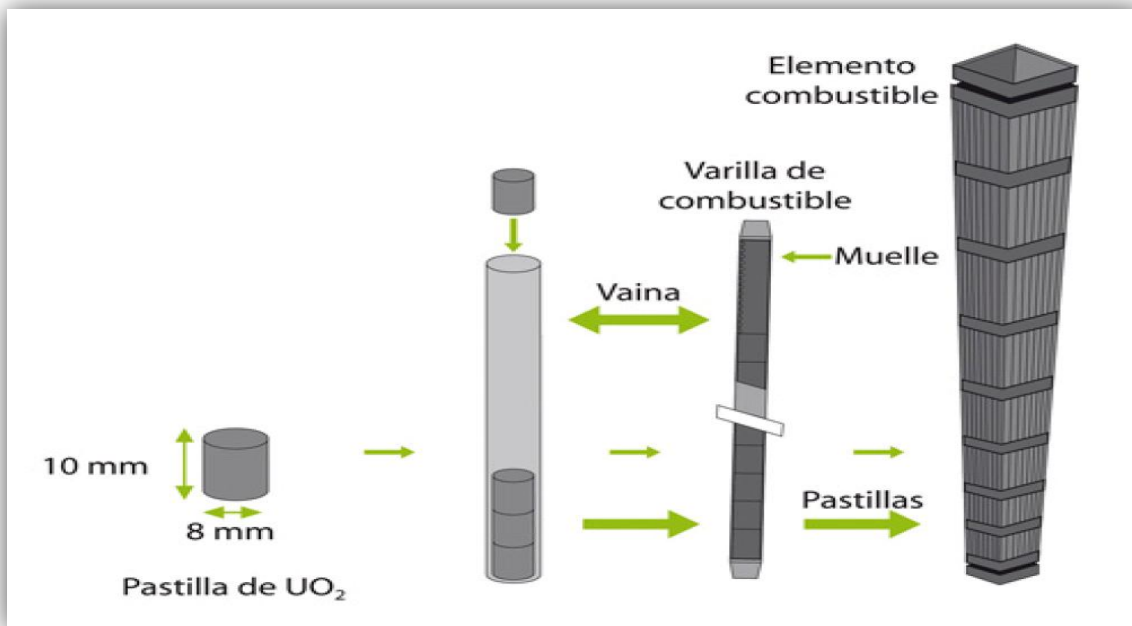
Aunque el acero inoxidable se utilizó en los diseños originales como material de vaina y esqueleto, pronto fue sustituido en las partes activas por otros materiales como Inconel (aleación austenítica de base níquel-cromo) de alta resistencia mecánica a altas temperaturas, y aleaciones de circonio, debido a la su baja absorción de neutrones térmicos comparado con el hierro y el níquel. En esta categoría están el Zr-4, el ZIRLO© y últimamente el ZIRLO© optimizado como material de vaina, que es una aleación con bajo contenido en estaño, parcialmente recristalizada, de demostrada alta resistencia frente a la corrosión. Además se están ensayando otras aleaciones de circonio e incluso se piensa, para un futuro más lejano, en vainas cerámicas y otros materiales alternativos.

El esqueleto del elemento combustible

Está compuesto por cabezal superior, cabezal inferior, tubos guías que unen los cabezales y rejillas intermedias, tratadas en el siguiente apartado, para sostener las barras.

El cabezal inferior, de acero inoxidable, soporta el peso del elemento, actuando como base de empotramiento de los extremos inferiores de los 24 tubos guía así como alojamiento del tubo de instrumentación. Tiene la función de guiar el elemento en su posición en la placa soporte inferior del núcleo. El diseño actual incorpora una gran cantidad de taladros de pequeño diámetro para permitir el paso del refrigerante evitando en lo posible la entrada de partes sueltas en el interior del elemento. En caso de necesitar reconstituir el elemento combustible, éste permite ser desmontado retirando este cabezal, tras darle la vuelta, reemplazando las uniones del cabezal a los tubos guías. Una modificación reciente ha sido la eliminación de los taladros de flujo en el faldón lateral.

lles resorte que actúan contra la placa soporte superior del núcleo, permitiendo al dilatación diferencial del elemento respecto al vasija del reactor así como el alargamiento del mismo por crecimiento bajo irradiación durante su vida en el reactor. También posiciona al elemento con respecto a los otros mediante alojamientos en la placa superior del núcleo. Tiene taladros para el paso del agua, de mayor diámetro que los del cabezal inferior. El cabezal superior actual tiene un diseño especial, junto con el extremo de los tubos guías que permite al elemento combustible ser desmontado en caso de querer sustituir alguna barra combustible, sin necesidad de voltearlo, ni de reemplazar las uniones. No se prevén cambios a corto plazo.



El cabezal superior es de acero inoxidable y tiene también la función estructural de sostener el peso del elemento durante el manejo, aloja los extremos de los tubos guía e instrumentación así como los muelle

Los tubos guía e instrumentación junto con los cabezales forman el esqueleto del elemento combustible. Por su interior se deslizan los conjuntos de barras de control y los detectores de instrumentación intra-

nuclear. Originalmente el material era de acero inoxidable, posteriormente de Zircaloy-4, y en la actualidad son de ZIRLO®. Han visto incrementado su diámetro exterior para dotarse de mayor rigidez estructural. La distancia entre cabezales debe absorber el crecimiento por irradiación y por dilatación térmica diferencial entre el esqueleto y las barras combustibles. Una función importante de los tubos guía aparte de servir de camino a las barras de control es la de sostener las rejillas en su posición. El tubo de instrumentación sirve de camino a la instrumentación intranuclear. No se prevén cambios a corto plazo.

Rejillas

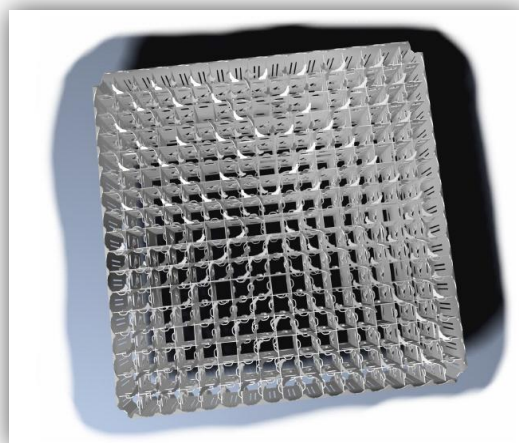
Rejillas mezcladoras: Las rejillas mezcladoras están situadas a intervalos regulares a lo largo del elemento combustible. Su geometría reticular, por medio de muelles y resaltes mantiene las varillas convenientemente posicionadas y separadas. Estas rejillas también incorporan aletas mezcladoras que imprimen un sentido rotacional al refrigerante en torno a las varillas y así mejoran considerablemente la transmisión de calor por convección forzada. Las aletas mezcladoras han sido optimizadas para proporcionar un cómodo margen térmico al flujo crítico de calor, o margen en el coeficiente de límite de ebullición nucleada, tanto en operación normal como en transitorios.

El diseño de los muelles de las rejillas ha evolucionado mucho desde su concepción original en l o paralelos a las varillas, a la posición inclinada actual para disminuir la resistencia hidráulica, así como se ha

aumentado la geometría y superficie de contacto, para minimizar los efectos de abrasión. Finalmente, se han incorporado bandas exteriores antienganche para asegurar la integridad del combustible durante las operaciones de carga y descarga en el núcleo.

Diseños más avanzados incorporan en el tercio superior del elemento combustible unas rejillas de altura más reducida, denominadas IFM, que no tienen función estructural, pero sí mejoran la transferencia de calor en los vanos de mayor flujo de calor.

Los diseños actuales de las rejillas mezcladoras son de material ZIRLO® y se está pensando en fabricarlas con un proceso de estampado transversal para reducir el crecimiento por irradiación, lo que aumenta el margen a la interferencia lateral de rejillas y evita la formación de huelgos en el contacto barra-rejilla.



Otras rejillas: Aparte de las rejillas mezcladoras están las rejillas extremas. No tienen aletas pues están en una zona donde la transmisión de calor no es crítica y no son por

tanto necesarias. El material es Inconel que presenta un mejor comportamiento mecánico con el quemado y permite una mayor sujeción de las barras. Recientemente se ha incorporado una rejilla adicional denominada rejilla protectora, entre el cabezal inferior y la primera rejilla de Inconel. También de Inconel, esta rejilla protectora tiene la función de filtro adicional de partículas sueltas y adicionalmente aumenta la sujeción de la barra, evitando la oscilación del extremo inferior de las barras combustibles.

Barra combustible

La barra consta del tubo, dos tapones y un muelle para mantener las pastillas contra el tapón inferior. El tubo, o vaina, típicamente de diámetro 0,95 centímetros y longitud de 4 metros, se fabrica por extrusión, y recibe tratamientos térmicos específicos para mejorar el comportamiento durante la operación. Una vez incorporado el muelle y las pastillas, se presuriza la barra con helio y se sueldan los tapones. Las soldaduras se radiografían e inspeccionan y se hace una prueba de estanqueidad. La barra es la primera barrera para contener los productos de fisión, los materiales de vaina están evolucionando para mejorar su resistencia a la corrosión y a la posible interacción con la pastilla en transitorios de potencia. La barra tiene que diseñarse para que aguante mecánicamente los esfuerzos derivados a que se haya sometida tanto por la diferencia de presión estática, que evoluciona con el quemado debido a la generación de gases de fisión, como por los transitorios operacionales que pueden ocurrir.

Pastillas de combustible

Las pastillas son de polvo de UO₂ sinterizado y es donde se genera el calor de fisión de uranio fértil (U235) y plutonio obtenido por transmutación del uranio fértil (U238). Durante el proceso de irradiación aparte de la dilatación térmica sufre, inicialmente, un encogimiento por colapso de poros producidos durante el proceso de fabricación y, posteriormente, un hinchamiento por acumulación de gases formados por los productos de fisión. Una fracción de los productos de fisión acaba saliendo de la matriz al espacio libre entre pastilla y vaina presurizando el espacio interior. La matriz del óxido sufre cambios morfológicos con el quemado, más acusado cuando se incrementa el quemado, se están estudiando aditivos para mejorar su comportamiento mecánico frente a la interacción con la vaina.

Se utiliza también óxido de gadolinio como veneno consumible, mezclado con el óxido de uranio, en algunas de las barras, al objeto de controlar el exceso de reactividad de las mismas cuando el combustible está fresco. La cantidad de gadolinio así como la disposición y número de las barritas que lo contienen dentro del elemento combustible depende de cada ciclo particular. También existe la opción de colocar en los extremos de las barras unos 30 cm de pastillas de uranio natural, en vez de pastillas con el enriquecido nominal, para reducir las fugas neutrónicas en ambos extremos, al objeto de optimizar la utilización del combustible.

Otras consideraciones

Hay muchos fenómenos involucrados en el diseño del combustible, no sólo motivados por el funcionamiento normal, sino también por la consideración de los posibles accidentes que pudieran provocar daños al elemento. Lo anterior hace necesaria una experimentación continua para conocer y controlar los diversos fenómenos que muchas veces son multidisciplinarios, sobre todo frente a cambios de materiales o de configuración, del propio elemento o de la central.

Merece especial atención indicar que el organismo regulador, en el caso de España el CSN, está, al tanto de la problemática y del cumplimiento de los requisitos establecidos, velando por que se mantengan los márgenes de seguridad sobre todo al incorporar cada uno de los cambios mencionados.

No es previsible a corto plazo un cambio importante en la geometría y/o composición de los elementos combustibles. El motivo es la elevada confianza y fiabilidad de los diseños actuales, unido a la complejidad de suponer cambios. Así los nuevos reactores de generación III y III+ de agua ligera operarán con combustible esencialmente idéntico al aquí descrito.