

## ¿CEMENTERIO DE RESIDUOS ó ALMACÉN DE ENERGIA? EL COMBUSTIBLE USADO DE LAS CENTRALES NUCLEARES

Francisco Martín-Fuertes (Comisión Técnica de la SNE)

### INTRODUCCIÓN

Cuando se agota el combustible de las centrales nucleares, tras permanecer algo más de 4 años en el reactor, el material resultante se considera residuo radiactivo en algunos países, si bien no es así en todos los casos. Así, países como Francia, Rusia, India, o el Reino Unido desarrollan planes para reciclar la mayor parte del combustible gastado.

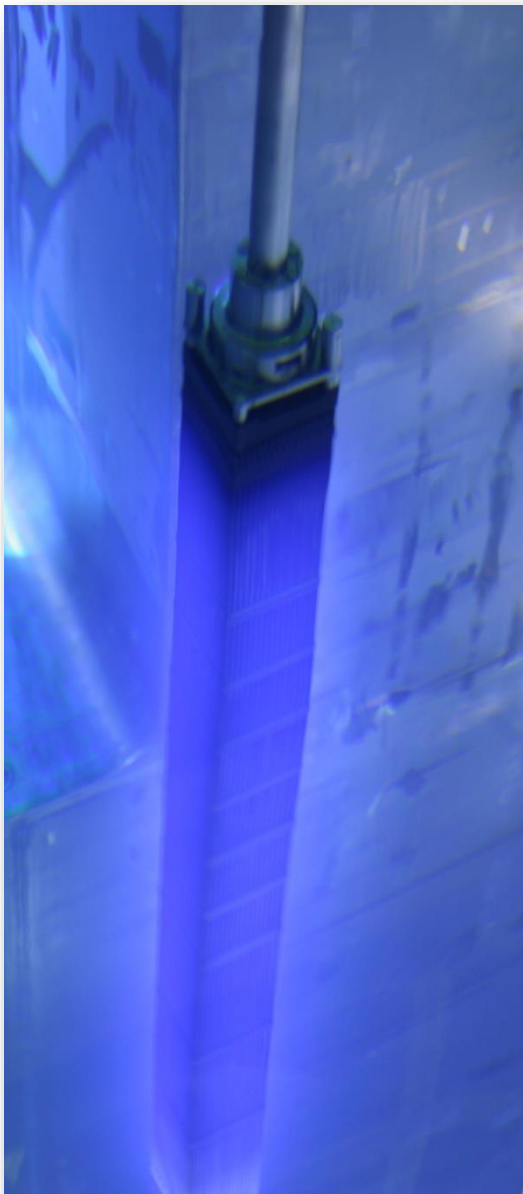
¿Qué nuevo uso admite el combustible usado de las centrales nucleares?

Como sucede con otros residuos, el combustible usado no es homogéneo, y conviene analizar con algún detalle su composición. El combustible original está formado por un compuesto de óxido de uranio en forma de pequeñas pastillas cerámicas. Las pastillas se fabrican en gran número y se apilan dentro de unas varillas inicialmente huecas, que se taponan y hacen estancas. Con un grupo de unas 260 varillas se conforma un haz de barras, que quedan fijas al encajar en unas rejillas. Este haz de barras se denomina *elemento de combustible*, y es la unidad de

carga y descarga del reactor, así como de transporte y almacenamiento fuera del reactor. Un reactor típico que desarrolla un millón de kW eléctricos tiene del orden de 160 elementos de combustible, que equivalen a unas 80 toneladas de combustible real.

Durante su permanencia en el reactor la pastilla de combustible modifica su composición, y al descargarlo encontramos aún elementos con gran valor energético. El plutonio, que aparece con un contenido aproximado del 1% en el combustible usado (es decir, 1% de todo metal presente: uranio, plutonio, americio, curio, etc.) conlleva un valor energético directo, en tanto que otros elementos como el uranio, todavía la contribución mayoritaria, del orden del 95%, o incluso el americio, minoritario, del orden del uno por mil, presentan un alto valor energético indirecto. Valor indirecto quiere decir que su aprovechamiento es posible tras someter el elemento a determinadas reacciones nucleares previas en el mismo reactor que lo aloja o mejor aún en otros de diseño alternativo. Finalmente, en el elemento combustible hay también productos

sin valor energético práctico a día de hoy y altamente radiactivos que resultaron de la fisión del uranio (suman un 4% del total), son los llamados productos de fisión.



*Elemento combustible irradiado en un reactor convencional, camino de su almacenamiento*

Pero antes de continuar, es conveniente interpretar las cantidades y porcentajes que se han mencionado para hacernos una idea más clara de la capacidad energética involucrada en el combustible. Un reactor típico

como el citado antes descarga una fracción de su núcleo completo cada vez que se detiene su operación al cabo de año y medio. Esto significa unas 30 toneladas de combustible usado descargadas (equivalentes a unos 60 elementos combustibles). Desglosando esta cantidad, la descarga consiste en 28.5 toneladas de uranio y unos 300 kg de plutonio, así como 1.2 toneladas de productos de fisión. También hay unos 50 kg de los denominados actínidos minoritarios: neptunio, americio y curio. El valor energético de estos elementos se comprende añadiendo que la fisión completa de tan sólo 1 gramo de plutonio o de uranio o de americio, produce tanta energía térmica como la combustión de dos toneladas equivalentes de petróleo (en tanto que, recordemos, no hay emisión de CO<sub>2</sub> en la generación de energía por fisión).

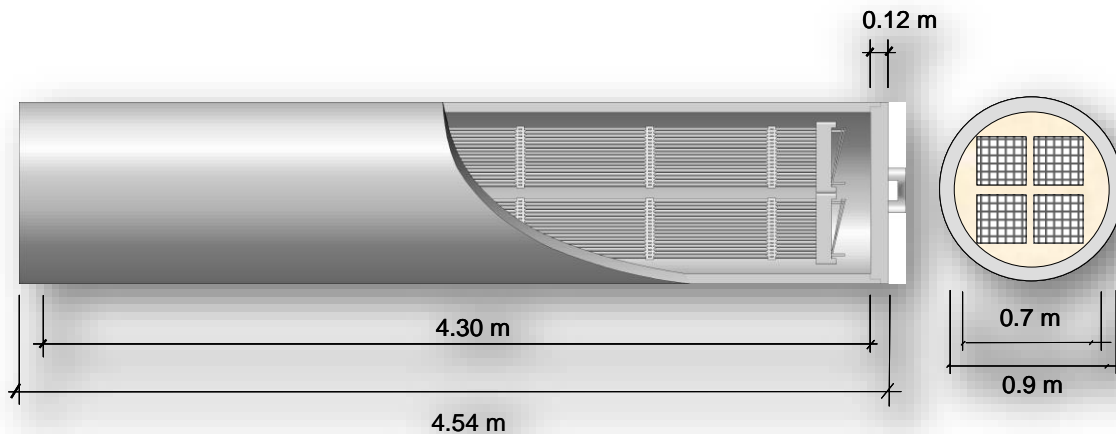
Por lo tanto, se observa que la reutilización de los componentes del combustible usado tiene un enorme interés energético.

### **PROCESOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL COMBUSTIBLE USADO**

La descarga de combustible es necesaria porque el reactor, por diseño, no permite aprovecharlo más. Así pues, ¿qué etapas hay que cubrir para poder aprovechar los componentes del combustible descargado?. En primer lugar se precisa disponer de procesos de *separación* de los materiales citados, que se encuentran homogéneamente mezclados en la pastilla. En la actualidad existe tecnología industrial aplicada a separar el plutonio y el uranio. El

plutonio separado sirve para fabricar un nuevo combustible para los reactores convencionales, denominado MOX, con contenidos en plutonio hasta del 10% del total. En cuanto al uranio separado, también es reciclable para el nuevo combustible (si bien, no es hoy la opción habitual).

Estos volúmenes finales se empaquetan en contenedores específicos dando lugar a los denominados bultos radiactivos. Al comparar volúmenes de bultos antes y después del reproceso se obtiene un factor 5 de reducción.



*Contenedor típico para transportar y almacenar cuatro elementos combustibles usados*

Como ejemplo de planta de separación podemos citar la planta de reproceso de La Hague en Francia, con capacidad para tratar del orden de 1700 toneladas por año de combustible usado. Hasta la fecha, se han tratado más de 25000 elementos usados. Por su lado, la planta de fabricación MELOX del nuevo combustible ha producido 5000 elementos de combustible tipo MOX.

Estos procesos de reproceso tienen ya un impacto positivo en la reducción del volumen de residuo: al disolver y tratar el combustible, los productos de fisión (más los actínidos minoritarios, el 1.5 por mil) constituyen, ahora sí, el residuo final. Pero el material radiactivo se mezcla con vidrio fundido, que al enfriarse proporciona una matriz estable que los inmoviliza. La matriz vítrea y su contenido es el volumen final de residuos de alta actividad que realmente se manipula.

Es interesante detenerse en la importancia de los actínidos minoritarios. A pesar de su presencia casi marginal en la masa del combustible usado tienen un largo periodo de semidesintegración, entre cientos y miles de años, así como una contribución importante en forma de calor que emite el residuo final. El calor resulta ser un parámetro clave en el diseño de almacenamientos temporales y definitivos, de manera que se investigan hoy en día procesos avanzados de separación para los actínidos minoritarios. Las líneas que se investigan son de dos tipos: (i) innovaciones en el proceso industrial disponible, de disolución acuosa, con empleo de fuertes ácidos y nuevas moléculas extractantes, y (ii) los denominados pirorprocesos, en los que el combustible se disuelve en una sal fundida (cloruros o fluoruros) a alta temperatura. En este caso, la masa resultante se somete a una diferencia de potencial a través de

electrodos específicos y se consigue segregar los materiales, por ejemplo, uranio por un lado, y los transuránidos conjuntamente por otro.



*Cápsula de acero que contiene en su interior una matriz de vidrio con residuos de alta actividad (dimensión típica: 1.6 m de alto)*

## PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

En el planteamiento general de aprovechamiento energético del combustible usado el siguiente elemento de importancia es la central de producción de energía. La tecnología de centrales nucleares implantada en nuestro país y mayoritariamente en los países de nuestro entorno es la de reactores de agua ligera, que se caracterizan por aprovechar sólo una fracción pequeña del uranio obtenido en la mina, bien directamente, o bien

tras una previa transmutación a plutonio 'in situ', dentro del reactor, pero de alcance muy limitado. Las centrales convencionales permiten también cargar cierto número de combustibles tipo MOX antes explicados, con lo cual el aprovechamiento neto del uranio original, vía plutonio, se incrementa algo (es el caso de Francia). Sin embargo, la reutilización es limitada en las centrales que optan por combustible MOX y además no es habitual hoy en día reutilizar el plutonio más de una vez, pues su calidad energética se deteriora en estos reactores con irradiaciones adicionales. Así, usos sucesivos del plutonio descargado requerirían compensaciones con añadidos de plutonio de más calidad.

Desde los primeros años de uso de la energía nuclear se ha trabajado en una tecnología de reactores alternativa, denominada de espectro rápido, y se ha hecho funcionar más de una docena de prototipos durante periodos de décadas. Rusia, Estados Unidos, Francia, Reino Unido, Japón, India y China disponen de esta experiencia operativa. En estas instalaciones las fisiones se obtienen con neutrones de mayor energía (más 'rápidos') que en las centrales de agua ligera, lo cual produce varias consecuencias de extraordinario interés práctico. Para empezar, la calidad energética del plutonio que se descarga se mantiene constante al irradiar con neutrones rápidos, con lo cual, podría reciclarse indefinidamente.

En segundo lugar, ocurre que una fracción elevada del uranio que se carga se transforma ahora en plutonio, mientras que en los reactores convencionales la transformación



ocurre en una proporción bastante menor. Incluso, disponiendo adecuadamente los materiales, además de la energía útil podemos obtener en un reactor rápido tanto o más plutonio que la cantidad inicial que cargamos (a costa de la desaparición del uranio: de ahí su valor energético indirecto). Esta característica es importantísima porque el uranio acumulado a día de hoy, por separar o ya separado, es abundante. Realmente, suponiendo una potencia nuclear mundial como la actual se estima que podríamos disponer de uranio como recurso energético ¡durante miles de años!. (Por cierto que el torio, más abundante que el uranio en la naturaleza, se prestaría a un ciclo similar de aprovechamiento).



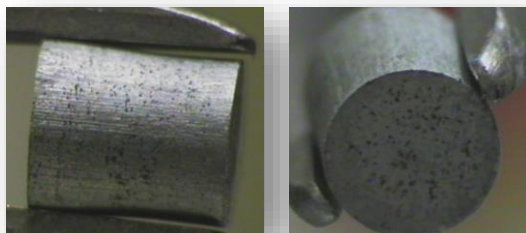
*Laboratorio para ensayos de técnicas avanzadas de separación*

Los reactores rápidos son algo más complejos que los actuales y se siguen desarrollando agrupados en varias líneas tecnológicas, las cuales vienen definidas fundamentalmente por el fluido utilizado como refrigerante del reactor y transporte de la energía térmica hasta el sistema de conversión eléctrico. Así, los reactores rápidos pueden ser de sodio, de plomo fundido o de gas, y existe un

cierto grado de competencia, a la vez que de colaboración, entre los países más comprometidos en su desarrollo (Francia, Rusia, India). Por sus características especiales, este tipo de reactores puede diseñarse con interesantes líneas de seguridad, como es la capacidad de poder disipar de forma pasiva el calor residual por convección natural durante muchos días, sin intervención de los operadores de la central. Se trata de un aspecto de gran actualidad que los nuevos diseños de reactores deben saber aprovechar. Otros aspectos de seguridad relacionados con diferencias en las configuraciones críticas del reactor en comparación con los convencionales son objeto de atención en la fase de diseño. En cualquier caso, se plantea que las características de seguridad de los reactores rápidos deben ser superiores que los actuales de agua ligera.

Una última característica de este tipo de reactores favorece su desarrollo y es que la transmutación de los actínidos minoritarios también conduce a la obtención de plutonio en una proporción elevada, con lo que el diseño de un almacenamiento definitivo de residuos radiactivos saldría beneficiado al no tener que alojar estos materiales, que además se aprovecharían energéticamente. Obsérvese que un aspecto importante en este planteamiento es que los procesos avanzados de separación deben tener objetivos de muy alta eficiencia, esto es, capacidades de recuperación del 99% o más de la masa en reproceso, y podemos añadir que existen resultados interesantes ya a escala de laboratorio. El importante resultado final es que los residuos definitivos del reactor rápido incluirían tan sólo productos de fisión y los

pequeños restos de los procesos de separación.



*Pastilla de combustible en desarrollo para reactor rápido (1 cm de altura, aproximadamente). Contiene óxidos de plutonio y americio para su transmutación en una matriz metálica de molibdeno*

tanto, resulta una tarea fundamental garantizar que existan puntos de vista globales, quizá una tarea tradicionalmente en manos de los gobiernos a través de su participación en iniciativas propias y multinacionales, de los centros de investigación o de universidades, con apoyo de otras instituciones de vocación generalista. En definitiva, se trata de que los actores públicos y privados consigan permanecer atentos a un gran potencial de desarrollo tecnológico.

## **CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA.**

Podemos concluir que el combustible usado, por almacenar en los llamados 'cementeros nucleares', tiene un extraordinario valor energético. Su aprovechamiento se encuadra en un planteamiento amplio y multidisciplinar de la tecnología nuclear, ya que resultan implicadas disciplinas de la física fundamental (nuclear, fluidos, termotecnia), de la física aplicada (metalurgia, ingeniería de potencia), y otros campos específicos (geología, protección radiológica, seguridad nuclear de las instalaciones). A nivel internacional, existe a día de hoy un buen trecho recorrido en este desarrollo tecnológico. Pero es preciso reconocer que su amplitud es difícil de abarcar por instituciones individuales, necesariamente obligadas a profundizar en sus áreas de especialización: diseñador de centrales, gestor de residuos, regulador. Este problema además puede verse acentuado en nuestros días, cuando los actores tienden cada vez más a fijarse en los intereses a corto o medio plazo. Por