

# El quemado de actínidos: ¿Una opción complementaria de la gestión de desechos?

*La partición y la transmutación de los actínidos y de productos de fisión pueden servir de instrumento adicional en las estrategias de gestión de desechos*

por L.H. Baetsle

La capacidad nucleoelectrica mundial asciende a casi 340 gigavatios eléctricos (GWe) y produce combustible gastado en una cantidad aproximada de 9000 toneladas anuales de metales pesados (tMP). Cada tonelada de combustible gastado contiene alrededor de 10 kg de actínidos transuránicos de los cuales 0,8 kg son actínidos inferiores, y 30 kg de productos de fisión, de los cuales 4 kg son nucleidos de período largo (plazos de semidesintegración superiores a los 30 años).

El destino del combustible gastado depende en gran medida de la política nacional relativa al ciclo del combustible. Para el 50% de la capacidad de generación de energía nucleoelectrica instalada a nivel mundial, esa política consiste en la reelaboración, la recuperación del plutonio, la vitrificación de los residuos y la evacuación de los desechos. Entre los países que la aplican se encuentran Francia, el Reino Unido, el Japón, Alemania, Bélgica, Suiza, la Comunidad de Estados Independientes y los países que otrora integraban la alianza soviética. En Francia y el Reino Unido se han construido y se explotan grandes instalaciones de reelaboración, mientras que en el Japón y Rusia se construyen plantas de gran tamaño.

La otra mitad de la capacidad nuclear del mundo produce combustible gastado como producto de desecho. El llamado "ciclo abierto" se aplica en los Estados Unidos, el Canadá, Suecia, España y algunos otros países. La tendencia que predomina actualmente es el almacenamiento a largo plazo del combustible gastado en instalaciones construidas, después de lo cual se ha de proceder a la evacuación en formaciones geológicas apropiadas.

El Dr. Baetsle es asesor del Presidente y de la Dirección General del Centro de Estudios de la Energía Nuclear (CEN/SCK) situado en Mol, Bélgica.

Los actínidos transuránicos aumentan a un ritmo aproximado de 90 tMP anuales. Aproximadamente 45 tMP permanecerán ocultas en las estructuras del combustible gastado y 45 tMP quedarán disponibles; el 92% de estas últimas será plutonio reciclado y el 8% actínidos inferiores (neptunio, americio, curio) inmovilizados en desechos vitrificados.

El desecho vitrificado se almacena en instalaciones construidas hasta su evacuación definitiva en repositorios subterráneos. La evacuación de los desechos vitrificados de alta actividad (DAA) que contienen los actínidos inferiores, o la del combustible gastado con plutonio y actínidos inferiores, son muy similares desde el punto de vista ambiental, al menos durante los primeros milenios. Más allá de los 10 000 años —la vida útil que técnicamente tiene un repositorio subterráneo— el combustible gastado con toda su carga de plutonio se convierte en el mayor peligro para el medio ambiente.

## Interés en la partición y la transmutación

Ya hace dos decenios que se formuló la interrogante: ¿Podemos evitar el peligro que plantean a largo plazo los actínicos transuránicos y los productos de fisión de período largo? En la Comunidad Europea y en los Estados Unidos se ejecutaron importantes programas de investigación y desarrollo (IyD) sobre esta cuestión, pero con muy poco éxito. Pronto se advirtió que era prácticamente imposible eliminar todos los actínicos trasuránicos, y que algunos productos de fisión, por ejemplo, el tecnecio 99, el cesio 135 y el yodo 129, son igualmente importantes en la evaluación de la dosis que llega al hombre en el plazo de un millón de años.

Sin embargo, existe un renovado interés en la partición y la transmutación (PyT) que obedece en gran medida a las dificultades con que se tropieza en

todo el mundo para encontrar formaciones geológicas adecuadas en lugares aceptables para el público.

En 1988, la Comisión Japonesa de Energía Atómica emprendió un programa de I+D muy importante y amplio. (Véase el artículo siguiente.) Dicho programa tiene por objeto la eliminación de los riesgos a largo plazo de la producción de energía nucleoelectrónica y la utilización óptima de los recursos. Esa iniciativa despertó el interés de algunos otros países nucleares importantes, por ejemplo, Francia, por establecer programas de investigación para mejorar o adaptar el proceso PUREX utilizado actualmente. El objetivo era reducir el contenido de plutonio en los DAA y eliminar los actínidos inferiores mediante la adopción de técnicas de extracción nuevas o adicionales.

La estrategia de método PyT sólo puede aplicarse con una política del ciclo del combustible que incorpore la reelaboración como una etapa fundamental en la que se reciclen todos los actínidos principales (uranio y plutonio), y que se permita aislar los actínidos inferiores y algunos productos de fisión de período largo de la corriente de efluentes, a fin de prepararlos para las subsiguientes etapas de transmutación.

### Estrategias y planes generales

La estrategia general de introducir el método de PyT como opción de la gestión de desechos se basa en el beneficio radiológico que se espera obtener de ella. La selección de los actínidos y los productos de fisión de período largo, que conviene eliminar mediante la transmutación, depende de una serie de factores técnicos que incluyen el riesgo y la descontaminación, así como del efecto del confinamiento geológico\*. Atendiendo a los índices de riesgo, los productos de fisión de período largo son mucho menos tóxicos que los actínidos una vez desintegrados el estroncio 90 y el cesio 137, es decir, después de transcurridos unos 600 años. (Véanse en los cuadros de la página 34 la clasificación de los actínidos y de los productos de fisión por factores de riesgo.)

Hay dos formas de intentar la separación de los actínidos inferiores y los productos de fisión de período largo de las corrientes de reelaboración, a saber, modificando los procesos actuales a fin de reorientar los nucleidos críticos hacia una solución única, por ejemplo, desechos líquidos de actividad alta, y utilizarla como fuente para los procesos de partición; y ampliando el proceso PUREX convencional a todos los actínidos inferiores y los productos de fisión de período largo en las plantas de reelaboración de segunda generación.

Antes de ejecutar uno de estos planes, parece obvio que hay que mejorar el producto de la separación del plutonio de los DAA en las centrales que están en explotación. La reorientación de los nucleidos hacia un producto de desecho único o hacia una sola corriente de desechos es muy importante en relación con el neptunio, que se presenta en muchas corrientes diferentes del proceso.

La aplicación de una fase de recuperación del tecnecio no sólo es importante en una estrategia de PyT, sino también un medio para reducir la contaminación del uranio y el plutonio.

Existen diversos reactivos para efectuar la partición de los actínidos. El que hasta ahora ofrece mejores perspectivas se conoce como CMPO, y puede utilizarse conjuntamente con TBP en el llamado proceso TRUOX. Aunque es preciso continuar los trabajos, cabe prever que, si se dispone de fondos suficientes, esta tecnología de separación u otra similar dará lugar a un proceso fiable compatible con el PUREX. La fase de partición generará elementos únicos o grupos de elementos que son las fuentes materiales de los procesos de transmutación (neptunio, americio, curio), o que podrían convertirse en recursos estratégicos para el futuro (elementos del grupo del tecnecio y el platino).

La función del confinamiento geológico no altera la clasificación de los productos de fisión. Dada su movilidad en la geosfera, el tecnecio 99 y el yodo 129 siguen ocupando una elevada posición en la lista de los productos de fisión que deberán examinarse en una opción de PyT.

A manera de conclusión podría afirmarse que una estrategia de PyT debe proporcionar a la humanidad tanta protección radiológica como la evacuación geológica. La selección de los nucleidos que se han de separar y transmutar y la medida en que habrá que eliminarlos dependerán del equilibrio que exista entre la creciente desconfianza en los méritos de la evacuación geológica —puesto que el plazo de desintegración escapa a la imaginación del hombre— y el aumento de los costos de la gestión de desechos como resultado del mejoramiento de la reelaboración y del proceso de PyT.

La partición y transmutación de los actínidos no es otra opción a largo plazo de la gestión de desechos, sino una técnica complementaria de la evacuación geológica capaz de reducir aún más los efectos radiológicos del ciclo del combustible durante un período muy largo.

### Reciclado de actínidos inferiores

Si la partición se ejecutara en las grandes plantas de reelaboración (La Haya, Sellafield, Rokkashomura, etc.), se dispondría anualmente de una producción total de alrededor de 1700 kg de neptunio 237 y 1500 kg de americio (incluidos algunos kg de curio), lo que equivale aproximadamente al 44% del total de la producción mundial.

Según el método de transmutación empleado, los actínidos inferiores se acondicionarían como óxidos o metales en instalaciones de fabricación del combustible especialmente equipadas que deben construirse especialmente para tales fines. Según el tipo de reciclado (homogéneo o heterogéneo), la capacidad de fabricación asignada deberá oscilar entre 68 y 85 toneladas anuales de mezcla de óxido (MOX). Esas instalaciones se relacionarían estrechamente con las actividades de las plantas de reelaboración.

La producción de combustible metálico se basa en un proceso de refinación pirometalúrgico que ya se encuentra en la etapa experimental de desarrollo en

\* El autor puede proporcionar amplios detalles técnicos.

**Actínidos en desechos de alta actividad**

	CIPR-61	1/tMP
1	<sup>241</sup> Am	3,3 – 12,3 × 10 <sup>13</sup>
2	<sup>243</sup> Am	1,8 – 2 × 10 <sup>12</sup>
3 (1%)	<sup>240</sup> Pu	7,6 – 8 × 10 <sup>11</sup>
4 (1%)	<sup>239</sup> Pu	3,2 – 3,5 × 10 <sup>11</sup>
5	<sup>237</sup> Np	4,7 – 6,4 × 10 <sup>10</sup>
6	<sup>246</sup> Cm	2,4 – 2,7 × 10 <sup>10</sup>

**Produits de fission**

	Nucléides	1/tMP
1	<sup>90</sup> Sr	3,9 × 10 <sup>12</sup> – 2,13 × 10 <sup>4</sup>
2	<sup>137</sup> Cs	3,8 × 10 <sup>12</sup> – 3,66 × 10 <sup>4</sup>
3	<sup>99</sup> Tc	1,6 × 10 <sup>9</sup>
4	<sup>126</sup> Sn	6,6 × 10 <sup>8</sup>
5	<sup>129</sup> I	5,8 × 10 <sup>8</sup>
6	<sup>135</sup> Cs	1,3 × 10 <sup>8</sup>
7	<sup>93</sup> Zr	9,4 × 10 <sup>7</sup>

Notas: Las clasificaciones se basan en el criterio que aparece en la CIPR-61 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica y en el volumen de agua potable necesaria para diluir una mezcla de radionucleidos hasta alcanzar límites aceptables de agua potable. Las clasificaciones de los riesgos de los actínidos comprenden a la forma en que se presentarían en DAA enfriados durante un período de 200 a 1000 años.

**Clasificación de los productos de fisión de período largo y de los actínidos por riesgo radiológico**

los Estados Unidos y el Japón. Habría que construir una capacidad total de fabricación para la reelaboración de combustible en seco a fin de elaborar los actínidos inferiores provenientes de los Estados Unidos y de algunos otros países.

No obstante, esas instalaciones no estarían vinculadas con las actividades convencionales de reelaboración. Formarían parte de los complejos de reactores rápidos para el quemado de actínidos y tendrían una capacidad asignada que dependería de la potencia del reactor de cada emplazamiento.

**Transmutación de actínidos inferiores**

En principio es posible transmutar los actínidos inferiores generados en las centrales nucleares existentes. Con todo, la transmutación es lenta y produce esencialmente nucleidos más pesados, además de que la reutilización frecuente de materiales de combustible gastado es difícil si se adopta el reciclado homogéneo. Aún no se ha desarrollado suficientemente el reciclado heterogéneo de actínidos inferiores en elementos combustibles de diseño especial. El americio puede transmutarse en determinadas condiciones.

La transmutación más eficiente de actínidos inferiores se logra en los reactores rápidos de neutrones capaces de transformar los actínidos en productos de fisión. Un aspecto muy importante que hay que señalar es la gran cantidad de actínidos inferiores que se generan en un reactor rápido. Ello permite la transferencia de casi toda la producción anual a un reactor de "incineración". Sin embargo, la producción neta anual de incineración sólo se limita a aproximadamente el 5%.

Actualmente se estudian reactores especialmente diseñados para quemar plutonio y los actínidos inferiores producidos en una central de reactores de agua ligera. El reactor rápido integral (IFR), desarrollado en los Estados Unidos, y el reactor quemador de actí-

nidos inferiores (MABR), estudiado en el Japón, son dos nuevos conceptos dirigidos a la incineración nuclear de los actínidos.

**Enfoques y opciones**

En conclusión, el método de PyT se está convirtiendo en un instrumento adicional de la estrategia general de gestión de desechos para reducir la repercusión radiológica de los actínidos y de los productos de fisión de período largo. Ahora bien, no puede sustituirse totalmente la evacuación geológica.

El mejoramiento de la reelaboración puede reducir considerablemente el contenido de plutonio en los DAA. Algunas técnicas de partición del americio y el curio ofrecen perspectivas alentadoras y la reorientación del neptunio en la reelaboración convencional resulta ventajosa.

La formulación de un plan de partición amplio que incluya todos los actínidos inferiores y los productos de fisión de período largo, sigue siendo un objetivo lejano y exige ingentes esfuerzos de IyD.

La transmutación de nucleidos separados en agujas de combustible o blancos de irradiación es una fase muy importante de la estrategia general de PyT que reclama, además, un análisis tecnológico y económico minucioso en el marco de una vasta tecnología de transmutación.

La transmutación es un proceso lento que requiere reactores con flujos neutrónicos elevados y/o energéticos. Estos tipos de flujos neutrónicos se producen en los reactores de flujo elevado y en los reactores rápidos. La producción resultante del proceso de transmutación en reactores especialmente diseñados, como el IFR o el MABR, es relativamente alta. Sin embargo, el plazo de destrucción de los nucleidos es muy prolongado (de 20 a 30 años) según los tiempos de enfriamiento y del ciclo del combustible. Los reactores accionados por aceleradores proporcionan a las instalaciones de irradiación flujos superiores en aproximadamente un orden de magnitud, y podrían acortar los períodos de irradiación de forma sustancial.

Es necesario realizar un análisis muy detallado de los aspectos económicos del método de PyT. Ello es importante porque el mejoramiento de la reelaboración, la partición química, la fabricación de objetivos y la elaboración del combustible, el desarrollo de reactores rápidos y las actividades de reciclado para el combustible de actínidos inferiores exigen la construcción y explotación de importantes instalaciones del ciclo del combustible nuclear. Asimismo, requieren el desarrollo de tecnologías maduras de partición y transmutación aplicables a cantidades industriales.

Estos esfuerzos deben compararse con los problemas asociados a la aceptación pública de los repositorios geológicos y a los riesgos retardados que entraña la migración de nucleidos de período muy largo en las capas geológicas. El empeño de reducir los costos de la evacuación geológica debe ser el motor económico que impulse el proceso de PyT, y las técnicas encaminadas a minimizar la exposición del hombre a las radiaciones deben ser el móvil que ayude a reducir los efectos radiológicos a largo plazo de la producción de energía nucleoelectrónica.