

# Ciclos del combustible nuclear: Ajuste a las nuevas realidades

*Las cambiantes condiciones políticas y económicas han reiniciado el debate mundial sobre las posibilidades de reelaborar y reciclar el combustible nuclear*

por  
B.A. Semenov y  
N. Oi

Desde el decenio de 1970, período en que la energía nucleoelectrónica se situó entre las fuentes energéticas de crecimiento más acelerado, esta tecnología ha venido contribuyendo notablemente al suministro de electricidad en muchos países. En estos momentos la energía nucleoelectrónica produce poco más del 17% de la electricidad total generada en el mundo y aporta más del 25% en 15 países.

Durante los años noventa la energía nucleoelectrónica seguirá siendo una de las principales fuentes de electricidad a nivel mundial. Sin embargo, su ritmo de crecimiento ha disminuido y según las proyecciones mantendrá un nivel modesto durante todo el decenio. Al propio tiempo, se prevé que los suministros de uranio y plutonio —las fuentes energéticas de las centrales nucleares— aumenten considerablemente y se acumulen excedentes cada vez mayores.

Las estrategias y los enfoques de las industrias que caracterizan el mercado nuclear se han visto influidas por el carácter cambiante de la situación actual y también por consideraciones económicas, ambientales y políticas que repercuten en el desarrollo general de la energía y la electricidad en el mundo. A nivel internacional, el debate se centra cada vez más en una serie de operaciones y procesos industriales asociados con lo que comúnmente se denomina "ciclo del combustible nuclear". (Véase el recuadro.) Entre estas actividades están la extracción de uranio, el enriquecimiento y la fabricación del combustible, la reelaboración y el reciclado posterior del combustible gastado (ya utilizado), y la gestión de los desechos nucleares y del combustible gastado.

Dado que las circunstancias que influyen sobre el desarrollo de la energía nucleoelectrónica están en un proceso de cambios, conviene analizar cómo estas

actividades del ciclo del combustible se están adaptando a las nuevas situaciones. En este artículo se ofrece un breve panorama de lo acontecido y se describen las diferentes actividades que realiza el OIEA a nivel internacional mediante su programa relativo al ciclo del combustible nuclear.

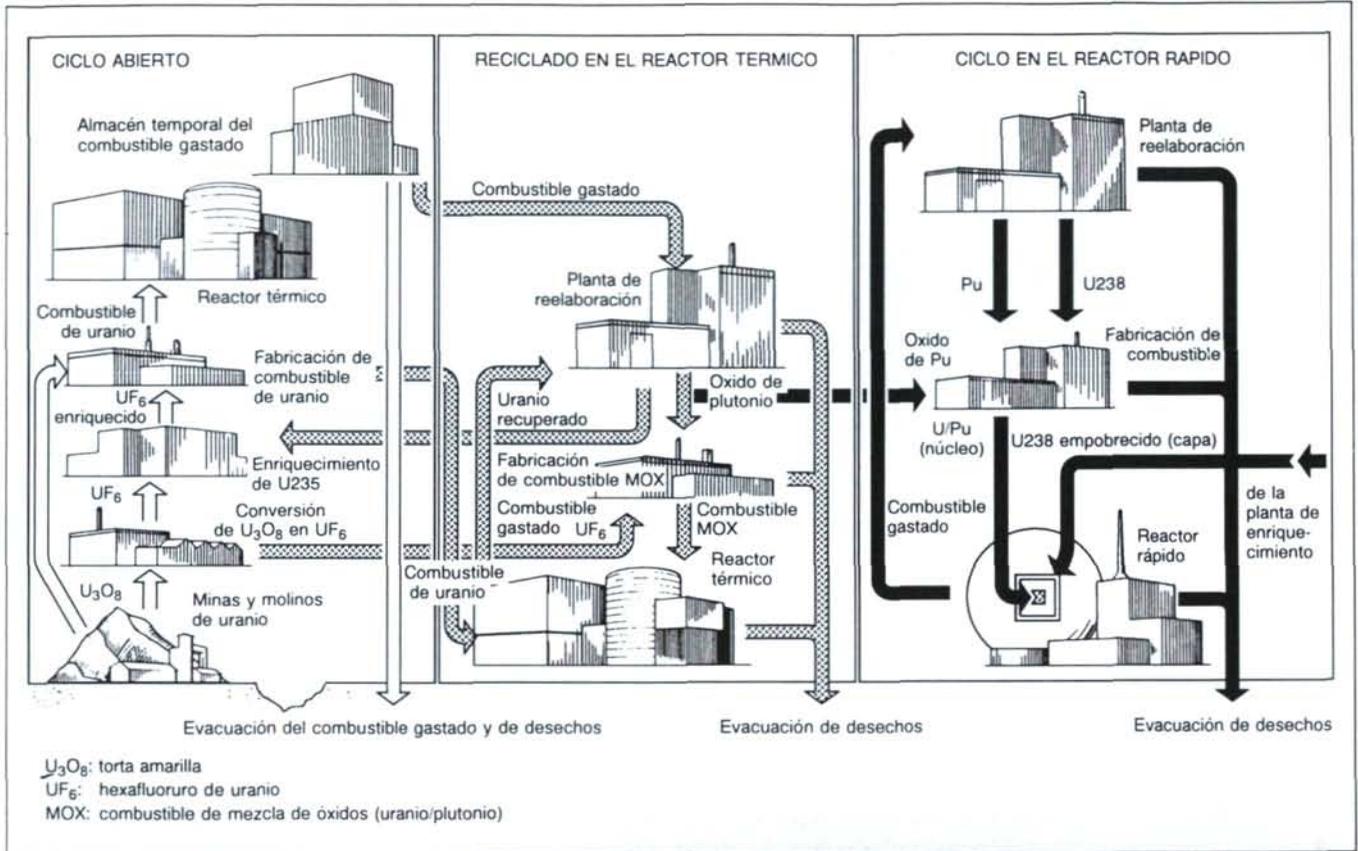
## Evolución del ciclo del combustible nuclear

El concepto de ciclo del combustible nuclear no es nuevo; su origen se remonta casi al momento en que surgió de la idea de emplear la fisión nuclear controlada para generar electricidad. Cuando se crearon las primeras centrales nucleares, generalmente se daba por sentado que el combustible de los reactores de potencia sería reelaborado y que el uranio y el plutonio recuperados serían reciclados.

En aquellos tiempos el mineral de uranio era un producto básico escaso y caro, por lo que era natural suponer que las ofertas económicamente disponibles no satisfarían las demandas derivadas del uso generalizado de la energía nucleoelectrónica. Por ello, al parecer era esencial extraer todo el contenido energético posible del uranio, y no sólo del uranio 235. Para explotar de manera tan completa los recursos de uranio es imprescindible reelaborar el combustible gastado y extraer plutonio para quemarlo en reactores "rápidos" especialmente diseñados al efecto. Este enfoque se hizo más atractivo al surgir el concepto del reactor reproductor rápido, que podía producir más combustible que el que consumía. Por tales razones, durante los años sesenta muchos países asignaron una alta prioridad al desarrollo de reactores rápidos y se esperaba que muchos de ellos estuvieran instalados en el decenio de 1980.

Así pues, hasta comienzos de los años setenta el ciclo del combustible nuclear se concebía como una secuencia ordenada de procesos que comenzaba con la extracción, el tratamiento y la conversión del uranio; continuaba con el enriquecimiento del combustible, la fabricación del combustible y la generación de electricidad; y finalizaba con la reelaboración y el reciclado del plutonio y el uranio en reactores

El Sr. Semenov es Director General Adjunto y dirige el Departamento de Energía y Seguridad Nucleares del OIEA. El Sr. Oi es el Jefe de la Sección de Materiales Nucleares y de Tecnología del Ciclo del Combustible de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y Gestión de Desechos de ese Departamento.



**Ciclos del combustible nuclear**

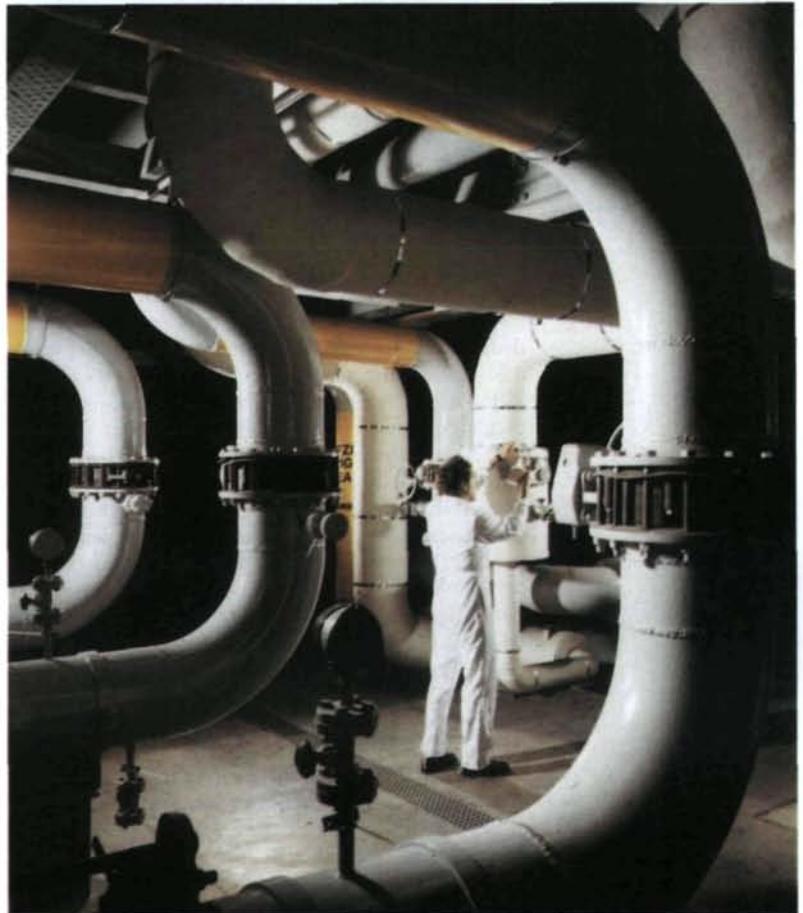
En la generación de energía nucleoelectrónica existen tres tipos diferentes de ciclo de combustible que dependen de si el combustible es reciclado o no y del tipo de reactor que se utiliza para producir electricidad.

● **Ciclo del combustible abierto.** En este ciclo el combustible gastado no se reelabora, sino que se almacena hasta su evacuación como desecho.

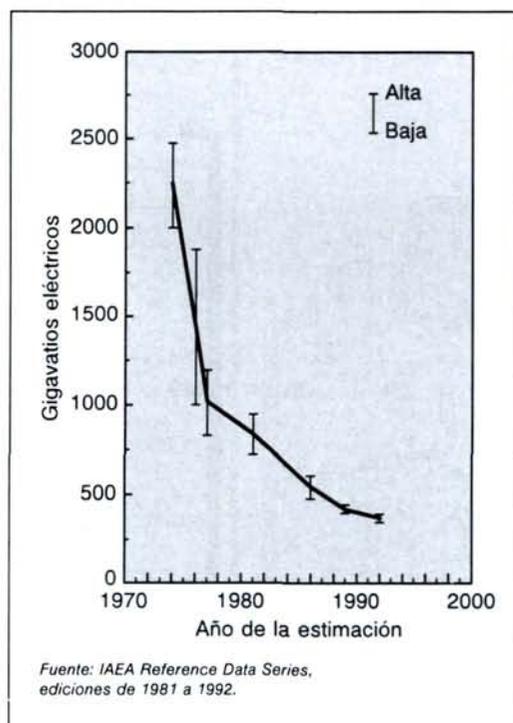
● **Ciclo del reactor térmico.** En este ciclo se reelabora el combustible gastado y el uranio y el plutonio se separan de los productos de fisión. Tanto el uranio como el plutonio se pueden reciclar en nuevos elementos combustibles. También es posible reciclar solamente el uranio y almacenar el plutonio y viceversa.

● **Ciclo del reactor reproductor rápido.** En este ciclo, también se reelabora el combustible gastado y el uranio y el plutonio se utilizan para fabricar nuevos elementos combustibles. No obstante, el reciclado se hace en reactores reproductores rápidos, los cuales poseen un núcleo central de combustible de uranio/plutonio rodeado por una capa de uranio empobrecido (uranio al que se ha extraído durante el proceso de enriquecimiento la mayor parte de los átomos de uranio 235), o en reactores quemadores. Este uranio empobrecido contiene principalmente átomos de uranio 238, algunos de los cuales se transforman en plutonio durante la irradiación. Así pues, mediante una explotación apropiada los reactores reproductores rápidos pueden producir un poco más de combustible que el que consumen, de ahí su nombre de "reproductores".

Interior de una planta de centrifugación para enriquecer el uranio. (Cortesía: BNFL)



**Proyecciones de la capacidad nuclear instalada en los países de economía de mercado en el año 2000**



rápidos, y la evacuación definitiva de los desechos procedentes de las plantas de reelaboración. En esencia, el cierre del ciclo del combustible significaba emplear de manera eficaz el plutonio generado en reactores térmicos para alimentar reactores reproductores rápidos.

### Por qué ha variado el concepto

La situación ha cambiado extraordinariamente durante los últimos 20 años. Hoy día no existe ninguno de los tipos de ciclo del combustible cerrado que, según se previó originalmente, estarían funcionando en los años ochenta. A pesar de que se han hecho demostraciones experimentales del cierre del ciclo del combustible nuclear en Francia, el Japón, el Reino Unido y Rusia, aún no se ha demostrado a escala comercial.

Las opiniones se dividen hoy en dos escuelas. Una de ellas considera que el plutonio no tiene valor económico como fuente energética y que el combustible gastado debe ser evacuado de una manera segura (ciclo abierto). La otra apoya en esencia el ciclo del combustible nuclear tradicional (ciclo cerrado). Esta diferencia de opiniones se debe mayormente a los pronósticos sobre el crecimiento de la electricidad de origen nuclear y sobre la disponibilidad de ofertas económicas de uranio, aunque también tiene matices políticos y de carácter ambiental.

Cabe señalar que el plutonio se puede utilizar en reactores rápidos para producir energía con mayor eficiencia y tiene la ventaja adicional de que se puede reducir el inventario de elementos transplutónicos inherentes al ciclo abierto. En el ciclo cerrado, el quemado del plutonio en forma de combustibles de mezcla de óxidos (MOX) en reactores de agua ligera

(LWR) es sólo una solución temporal hasta que pueda contarse con reactores rápidos.

### Proyecciones de la energía nucleoelectrónica y suministros de combustible

Durante los últimos 20 años, las proyecciones sobre la producción de electricidad de origen nuclear en el año 2000 han sufrido un gran cambio. En 1980, cuando se realizaron los estudios de la Evaluación Internacional del Ciclo del Combustible Nuclear (INFCE), se predijo que en el año 2000 la producción de electricidad de origen nuclear oscilaría entre 850 y 1200 gigavatios eléctricos (GWe) en los países de economía de mercado\*. Esto contrasta marcadamente con la última estimación del OIEA, según la cual la capacidad mundial de generación de energía nucleoelectrónica en el año 2000 sería de 372 a 382 GWe. (Véase el gráfico.) Al finalizar 1992 la capacidad nuclear neta mundial era de 330 GWe.

En cuanto a las condiciones del mercado de uranio, se puede conocer cuál ha sido el curso de los acontecimientos leyendo las diferentes ediciones de *Uranium Resources, Production and Demand*, conocido generalmente como el "Libro Rojo", publicación conjunta del OIEA y de la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (AEN/OCDE) que apareció por primera vez en 1965. Desde la edición de 1977, el Libro Rojo ha adoptado una categoría de costo de 80 dólares de los Estados Unidos de América por kilogramo de uranio (kg/U) para determinar los recursos razonablemente seguros, a pesar de que desde entonces el valor real del dólar ha disminuido en el 50%.

Durante la evaluación de la INFCE en 1980, los recursos razonablemente seguros a 80 dólares por kg/U ascendían a 1,85 millones de toneladas de uranio. En 1991 se estimaron en 1,5 millones de toneladas. (Véase el gráfico.) Sin entrar a considerar detalles de menor importancia, los recursos estimados han permanecido casi en el mismo nivel desde 1975. Las estimaciones de los recursos corresponden aproximadamente a 30 años de necesidades futuras, sobre la base de las necesidades pronosticadas para el año 2000.

El precio del uranio ha descendido sostenidamente del nivel que tuvo en 1980 (40 dólares por libra) a su actual nivel de menos de 8 dólares por libra en el mercado de entrega inmediata. Muchos productores han detenido sus operaciones en espera de la recuperación del precio del uranio prevista para el quinquenio 1995-2000. Debido a los bajos precios actuales, en 1991 la producción de uranio en los países occidentales descendió a 27 000 toneladas. Esta cifra es inferior a la cantidad de uranio que necesitaron los reactores nucleares del mundo ese año, a saber, 44 500 toneladas. La producción deficitaria se compensó con materiales de reserva y otros

\* En aquellos momentos, estos países estaban comprendidos en la categoría conocida como WOCA, es decir, el mundo menos los países con economía de planificación centralizada.

inventarios que incluyeron importaciones de China y la antigua Unión Soviética. (Véase en esta edición el artículo sobre la situación del mercado de uranio.)

Según el concepto de ciclo del combustible cerrado, se esperaba que el plutonio sustituyera gradualmente al uranio enriquecido como combustible nuclear primario. Sin embargo, no ha ocurrido así. Hoy hay menos esperanzas de que el valor del uranio y el plutonio recuperados en el proceso de reelaboración sea superior al costo de la reelaboración.

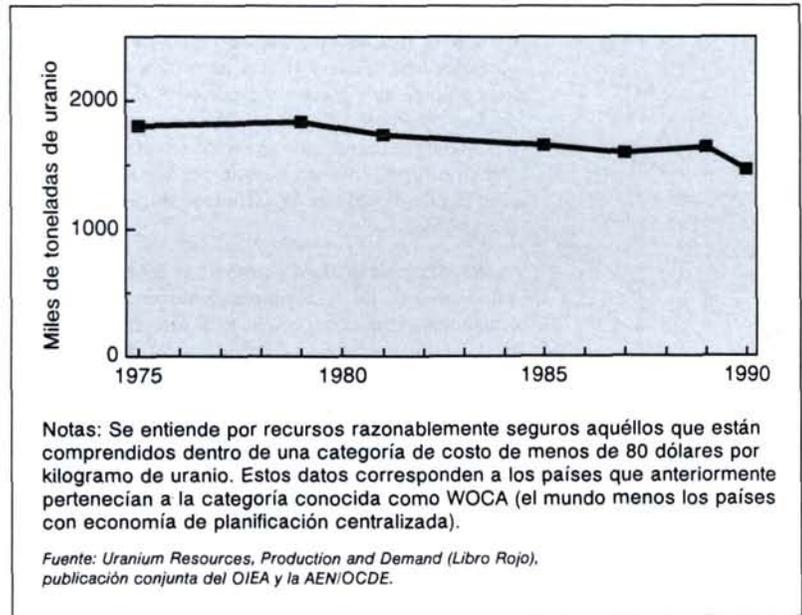
### Perspectivas de las opciones del ciclo del combustible nuclear

En estos momentos existe un acalorado debate entre los proponentes de las dos opciones del ciclo del combustible nuclear. Al parecer la opción de ciclo abierto combina los pronósticos pesimistas sobre el futuro de la energía nuclear con los pronósticos optimistas acerca de la disponibilidad de recursos de uranio poco costosos. Sin embargo, en nuestra opinión esta opción lleva implícito un problema. El combustible gastado, es decir, el plutonio vitrificado mezclado con productos de fisión que se evacua en repositorios geológicos, posiblemente se convertirá en minas de plutonio después de miles de años. Esto se debe a que la mayoría de los productos de fisión se desintegrarán con mayor rapidez que el plutonio.

La opción del ciclo del combustible cerrado está respaldada por la perspectiva a largo plazo de la energía nuclear. Se ha estimado que la actual población mundial de 5500 millones de personas aumentará a razón de 100 millones por año. Según las estimaciones, en el año 2010 se necesitará aproximadamente cuatro veces la energía eléctrica que se consume hoy. No es posible satisfacer un incremento tan drástico sin poner en peligro el medio ambiente a menos que aumente el empleo de la energía nuclear. Además, es probable que en los próximos 20 años aumente la competencia comercial en el proceso de reelaboración y en la fabricación de combustible MOX con la consiguiente baja sustancial de los precios. La escalada inevitable del precio del uranio aumentará la justificación económica del uso del plutonio en los reactores rápidos y, por tanto, del cierre del ciclo de combustible.

Aún así, la opción del ciclo del combustible cerrado presenta varias dificultades concomitantes. Entre las más importantes cabe citar las políticas y reglamentaciones nacionales que rigen la concesión de licencias y su repercusión sobre el aspecto económico de los futuros reactores rápidos. Sin dudas, las minuciosas consideraciones reglamentarias que se han elaborado durante decenios para los actuales reactores de agua serán adaptadas para que abarquen los reactores rápidos. Esto dará lugar a grandes atrasos e impondrá pesadas cargas económicas.

Es posible considerar la introducción de algunas modificaciones a las dos opciones básicas del ciclo del combustible. Una de ellas consistiría en aplicar niveles de quemado muy altos al combustible de los actuales reactores de agua ligera para producir un plutonio cuya composición isotópica sea más fácil de verificar y salvaguardar. Otra modificación sería restablecer el ciclo de torio/uranio, que está exento del estigma asociado con el plutonio.



Es probable que el desarrollo futuro del ciclo del combustible nuclear sea diferente en cada país. Aquéllos que puedan sufragar los costosos recursos naturales quizás decidan, por razones políticas y de otra índole, reducir sus programas de energía nuclear y aplicar la opción de ciclo abierto. Otros, con seguridad, ampliarán sus programas nucleares y se esforzarán por aplicar la opción del ciclo cerrado. Tal vez aún deban transcurrir otros 20 años para que se pueda apreciar la orientación definitiva que adoptarán estas tendencias.

### Estimaciones de los recursos de uranio razonablemente seguros desde 1975

### La cooperación internacional y los programas del OIEA

Los programas del OIEA relativos al ciclo del combustible se están ajustando a las cambiantes e impredecibles circunstancias que rigen el desarrollo de la energía nucleoelectrónica. Están diseñados fundamentalmente para ayudar a los países a mejorar la seguridad, la fiabilidad y la viabilidad económica de sus ciclos del combustible nuclear, y a la vez reducir al mínimo las consecuencias para el medio ambiente y la salud.

Los programas del ciclo del combustible nuclear han estado comprendidos en las actividades del OIEA desde que se creó el Organismo. A pesar de que los recursos asignados para estos programas constituyen sólo una pequeña parte del presupuesto general del Organismo, los países han podido alcanzar muchos logros. Las actividades se desarrollan en cuatro esferas: recursos de uranio, rendimiento y tecnología de combustibles de reactores, gestión del combustible gastado y evaluación del ciclo del combustible nuclear. Además, se está realizando un importante trabajo mediante programas secundarios relacionados con los materiales estructurales que se utilizan en la industria nuclear. En todas las fases del ciclo del combustible nuclear, durante años las instalaciones se han visto plagadas de problemas que

tienen que ver con algunos tipos de materiales sometidos a la irradiación. La degradación de sus propiedades mecánicas y físicas ha provocado fallas de los componentes y costosos períodos de inactividad de los reactores. La corrosión de metales y aleaciones sigue planteando graves dificultades. Estos y otros problemas técnicos están recibiendo una atención internacional con la participación y el apoyo del Organismo.

**Recursos de uranio.** Como ya se señaló, el precio del uranio es un factor importante en el ciclo del combustible nuclear porque está directamente relacionado con los incentivos económicos de los reactores rápidos y de utilización del plutonio. Es esencial que los planificadores y dirigentes cuenten con una base de datos amplia y fiable sobre los recursos, y al efecto existe la opinión generalizada de que el mencionado Libro Rojo puede satisfacer esa necesidad. Recientemente el libro ganó amplitud y utilidad al incluirsele datos que antes no podían obtenerse sobre las antiguas repúblicas de la Unión Soviética y otros países. Está en marcha una labor de armonización de estos datos con los requisitos de las bases de datos y las necesidades de información actuales.

Durante muchos años el Organismo ha servido de centro de información sobre geología, exploración y extracción del uranio, procesamiento del mineral y análisis de la oferta y la demanda. Actualmente los trabajos también abarcan el cierre de proyectos de extracción y tratamiento de uranio por consideraciones de seguridad, protección ambiental, económicas y de obtención de licencia. También se hace hincapié en el apoyo a proyectos de cooperación técnica en países que solicitan asistencia para desarrollar sus programas nucleares con fines pacíficos y sus capacidades del ciclo del combustible.

#### **Comportamiento y tecnología del combustible.**

La vaina de combustible es el primer obstáculo para que el reactor libere productos de fisión en el medio ambiente. Tras una "epidemia" de fallas del combustible en los años setenta, el combustible de los actuales reactores de agua se comporta muy bien y sus fallas son escasas. Sin embargo, las demandas constantes de que se mejore el rendimiento del combustible podría hacer peligrar su fiabilidad. Existe en especial un gran incentivo para ampliar más que nunca el quemado del combustible con miras a reducir la cantidad de combustible gastado que se descarga. Al mismo tiempo, las empresas eléctricas siempre se inclinan a alcanzar un "móvil cero de fallas del combustible" a fin de mantener limpia la central eléctrica. Por ello, los vendedores, las empresas eléctricas y las autoridades encargadas de la concesión de licencias supervisan cuidadosamente el comportamiento del combustible y muestran interés en el intercambio de información, aunque se considera que ya la tecnología del combustible ha alcanzado la madurez, especialmente en los países occidentales.

Un Grupo Internacional de Trabajo sobre tecnología y comportamiento del combustible nuclear (IWGFPT), creado en 1977, sigue rigiendo la labor del OIEA en la esfera del diseño, la fabricación y el rendimiento del combustible. Actualmente está integrado por 25 Estados Miembros y tres organizaciones internacionales, y sirve de foro para el es-

tablecimiento de contactos entre los países desarrollados y los países en desarrollo.

**Gestión del combustible gastado.** Se ha estimado que en el año 2000 habrá almacenadas en todo el mundo más de 100 000 toneladas de combustible gastado procedente de reactores de potencia. Ese año, menos de la mitad de la cantidad total generada anualmente será reelaborada y el resto se almacenará durante largo tiempo en espera de su evacuación final en repositorios geológicos o antes de ser sometida a reelaboración. Debido a la tardanza en la instalación de los reactores rápidos, algunos países que cuentan con capacidad para la reelaboración están almacenando grandes cantidades de combustible gastado, por lo que el almacenamiento a largo plazo adquiere una importancia cada vez mayor. En estos momentos se están almacenando grandes cantidades de combustible en medio húmedo (piscinas) o en medio seco (cofres, cámaras o recipientes). Si bien hasta ahora el almacenamiento del combustible gastado no ha planteado problemas serios de seguridad, se reconoce que los problemas tecnológicos, de obtención de licencias y económicos que lleva asociados siguen constituyendo una esfera en que la cooperación internacional puede ser útil. (*Véase en la presente edición el artículo sobre este tema.*)

En 1984 se creó el Grupo Asesor del OIEA sobre gestión del combustible gastado. Este Grupo se reúne cada dos años para brindar asesoramiento técnico sobre el programa del Organismo y sirve de vehículo para el intercambio de información sobre la etapa final del ciclo del combustible nuclear, en especial el almacenamiento del combustible gastado. En estos momentos el Grupo Asesor está integrado por representantes de 12 países y la AEN/OCDE.

Una de las actividades de mayor importancia es la preparación de normas internacionales para el almacenamiento del combustible gastado. El OIEA está preparando guías de seguridad sobre el diseño y la explotación de las instalaciones de almacenamiento del combustible gastado, así como un documento sobre prácticas de seguridad.

Además, el Organismo está preparando un Programa de Asesoramiento sobre la gestión del combustible irradiado (IFMAP) que aborda cuestiones tocantes a los reactores de potencia y de investigación. Su objetivo es ofrecer orientación y capacitación dirigidas principalmente a especialistas de países en desarrollo.

**Evaluación del ciclo del combustible nuclear.** El OIEA lleva a cabo varias actividades que abarcan todo el ciclo del combustible nuclear. Ejemplo de ello es el estudio sobre las consecuencias que tienen para el medio ambiente y la salud las instalaciones del ciclo del combustible nuclear en condiciones normales y de accidente. Esto forma parte de un esfuerzo internacional denominado "DECADES" que consiste en la evaluación comparativa de las repercusiones de la energía nucleoelectrónica y otros sistemas energéticos sobre la salud y el medio ambiente.

Otra actividad importante es la relacionada con el plutonio. Se calcula que hay acumuladas en el mundo 86 toneladas de plutonio separado en el sector civil y según el pronóstico este inventario seguirá aumentando hasta el final del siglo. Su origen es la despro-

porción entre la producción y el uso del combustible. Se ha previsto que el Organismo desempeñe un nuevo e importante papel en la gestión internacional del plutonio y las actividades que la sustentan. Entre estas actividades podría estar una función relacionada con el plutonio procedente del sector militar que se recupera de las ojivas nucleares desmontadas.

### Fortalecimiento de la cooperación internacional

Desde el punto de vista de los acontecimientos que repercuten sobre la energía nuclear y su ciclo del combustible, los años venideros impondrán un reto a la comunidad internacional. La evolución de las políticas y los enfoques nacionales continuará influyendo sobre el alcance y la orientación de la cooperación internacional y, por extensión, sobre la labor del OIEA en diversas esferas.

Los programas del OIEA relacionados con las actividades del ciclo del combustible nuclear son parte integrante de los servicios del organismo a nivel internacional, y continuarán ajustándose a las fluctuaciones de la situación y los intereses de los Estados Miembros. Por su carácter de instrumentos para la cooperación internacional, los programas ayudarán a mejorar la seguridad, la fiabilidad y la viabilidad económica de las actividades nacionales del ciclo del combustible nuclear, así como a reducir al mínimo sus consecuencias para el medio ambiente y la salud.

Vista aérea de la planta de reelaboración de UP-3 en La Hague, inaugurada a principios de 1992. Abajo: Piscina de almacenamiento temporal de UP-3. (Cortesía: Cogema)

