

# El plutonio como fuente de energía: Análisis cuantitativo del panorama comercial

*A medida que crecen los inventarios de plutonio del sector civil, el interés internacional se centra en el uso y la gestión de las reservas*

por Pierre M.  
Chantoin y  
James Finucane

**E**l plutonio es un elemento que se forma en el combustible de los reactores nucleares durante su funcionamiento. Aunque puede separarse, almacenarse y posteriormente volver a utilizarse en el combustible reciclado para las centrales nucleares, el uso bien conocido del plutonio en la esfera militar como material para la fabricación de armamentos lo convierte en un problema delicado.

En este artículo se analizan varios aspectos importantes asociados al uso del plutonio como fuente de energía en el sector nuclear civil; no aborda aspectos relacionados con la esfera militar. Entre los temas específicos que se examinan están la formación de plutonio en el combustible nuclear, su separación durante la reelaboración y su reutilización (reciclado) en un tipo especial de combustible nuclear, un combustible obtenido de la mezcla de óxidos (MOX) de uranio y plutonio. Se abordan también las proyecciones de acumulación de plutonio en almacenes civiles a nivel mundial, y el papel que podría desempeñar el OIEA en la prestación de asistencia para asegurar que estos inventarios se manipulen, transporten, almacenen y administren sin peligro. La acumulación temporal —prevista para los próximos 10 a 30 años aproximadamente— es resultado de la demora en ejecutar los programas nacionales de construcción de reactores reproductores rápidos (FBR) que habrían utilizado el plutonio. Su duración dependerá sobre todo de la disponibilidad de instalaciones para fabricar el combustible MOX para los reactores de agua ligera, principal tendencia observada en las centrales nucleares en explotación y en las que se construyen en la actualidad.

## Plutonio formado en combustibles nucleares

A lo largo de los próximos 15 a 20 años, en las centrales nucleares de todo el mundo se producirá una cantidad significativa de plutonio, que aumentará el número de reservas ya almacenadas. (Véanse los gráficos de la página 41.) En 1965 se produjo menos de una tonelada. En 1992, con más centrales en explotación, se produjeron 50 toneladas (contenidas en unas 9000 toneladas de combustible gastado).

Los Sres. Chantoin y Finucane son funcionarios de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y Gestión de Desechos del OIEA.

Desde que se comenzó a generar energía nucleoelectrónica con fines comerciales, se han acumulado aproximadamente 600 toneladas de plutonio en los combustibles gastados. Se prevé que en los años 2005 y 2010 se habrán acumulado unas 1000 a 1500 toneladas, respectivamente\*. Debido a que una tonelada de plutonio físil posee teóricamente una energía equivalente a cerca de 22 millones de megavatios-hora de electricidad, algunos países han decidido reelaborar este combustible gastado. El combustible gastado es tratado químicamente (reelaborado) para recuperar el plutonio y después reciclado en el combustible MOX que se usa en los reactores. La calidad del plutonio recuperado durante la reelaboración del combustible gastado depende fundamentalmente del tipo de reactor y el grado de utilización del combustible (quemado) durante el proceso.

## Reelaboración o almacenamiento del combustible

La reelaboración es una tecnología probada y disponible a escala comercial disponible (Véase el cuadro.) En 1992, se calculó que la capacidad total de reelaboración de todos los tipos de combustibles era de 4015 toneladas de metal pesado (tMP), capacidad que representa sólo un 40% del combustible que descargan los reactores de potencia. Todas las plantas de reelaboración en funcionamiento emplean tecnología Purex avanzada. No se prevé que se presenten problemas de envergadura con el combustible de más alto grado de quemado (de hasta 45 megavatios-día por kilogramo de metal pesado) o con el combustible MOX.

En algunos países se están ampliando las capacidades de reelaboración. En Francia, la planta de reelaboración UP-2 está en proceso de modificación a fin de duplicar su capacidad anual hasta las 800 tMP y empezará a funcionar con el doble de su capacidad en 1994 ó 1995. En el Reino Unido se

\* Las estimaciones del plutonio son resultados de los cálculos realizados con el código de computadora CYBA utilizado por la División del Ciclo del Combustible Nuclear y Gestión de Desechos del OIEA. Los cálculos se han basado en la producción de electricidad y los modelos genéricos de gestión de combustible y reactores para cada tipo de reactor en explotación.

Capacidades mundiales existentes y proyectadas para la reelaboración del combustible nuclear

|              | Tipo de combustible | Proyecciones |             |             |             |             |
|--------------|---------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|              |                     | 1992         | 1995        | 2000        | 2005        | 2010        |
| Francia      | GCR                 | 600          | 600         | 0           | 0           | 0           |
|              | LWR                 | 1200         | 1600        | 1600        | 1600        | 1600        |
|              | FBR                 | 5            | 5           | 5           | 5           | 5           |
| India        | PHWR, RR            | 200          | 200         | 600         | 600         | 600         |
| Japón        | LWR                 | 100          | 100         | 900         | 900         | 900         |
| Reino Unido  | GCR                 | 1500         | 1500        | 1500        | 1500        | 1500        |
|              | LWR                 | 0            | 1200        | 1200        | 1200        | 1200        |
|              | FBR                 | 10           | 10          | 10          | 10          | 10          |
| Rusia        | LWR                 | 400          | 400         | 400         | 400         | 400         |
| <b>Total</b> |                     | <b>4015</b>  | <b>5615</b> | <b>6215</b> | <b>6215</b> | <b>6215</b> |

Notas: Los datos se expresan en toneladas de metal pesado anuales. GCR = reactor refrigerado por gas. LWR = reactor de agua ligera. FBR = reactor reproductor rápido. En la India la planta de Tarapur es un reactor de agua pesada a presión (PHWR) y Trombay es un reactor de investigación (RR). En Rusia, se aplazó la terminación de una planta de reelaboración con una capacidad anual de 1500 toneladas de metal pesado.

terminó la construcción de la Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP) de Sellafield, que debió de haber comenzado a funcionar en diciembre de 1992, aunque su puesta en marcha se ha visto demorada por problemas relacionados con la emisión de una licencia al emplazamiento. En el Japón, las obras de la planta de reelaboración de Rokkashomura, con una capacidad de diseño de 800 toneladas de metal pesado, comenzaron en abril de 1993 y deberán concluir hacia el año 2000.

Hasta finales de 1992, el sector comercial había reelaborado unas 46 000 tMP de combustible gastado. Según el tipo de combustible, esta cifra se desglosa en 34 000 toneladas procedentes de los reactores refrigerados por gas; 11 700 toneladas de los reactores de agua ligera, y 40 toneladas de los reactores reproductores rápidos.

Se prevé que a finales de siglo aumentará la capacidad de reelaboración proyectada —que depende de la demanda futura de servicios de reelaboración— y después se nivelará. (Véase el cuadro.) No es probable que la tecnología Purex, que ha demostrado su eficacia, sea reemplazada o modificada esencialmente, aunque podrían introducirse algunos cambios y mejoras. En materia de reelaboración es posible que los acontecimientos más importantes sean la reducción de los gastos de capital y de funcionamiento, la reducción de los desechos y el aumento del grado de automatización.

### Acumulación de plutonio separado

A fines de 1992 los inventarios totales de plutonio separado que existían en el mundo procedentes de los programas nucleoelectrónicos del sector civil se calculaban en 86 toneladas, según los datos notificados al OIEA por sus Estados Miembros.

Combustible gastado en Sellafield, Reino Unido. (Cortesía: BNFL)

| Instalaciones existentes | Capacidades por tipo de combustible en 1992 |             |           |            |
|--------------------------|---|-------------|-----------|------------|
|                          | GCR   | LWR         | FBR       | Otros      |
| Marcoule UP-1 (Francia)  | 600   |             |           |            |
| La Hague UP-2 (Francia)  |   | 400         |           |            |
| La Hague UP-3 (Francia)  |   | 800         |           |            |
| Marcoule APM (Francia)   |   |             | 5         |            |
| Tarapur (India)          |   |             |           | 150        |
| Trombay (India)          |   |             |           | 50         |
| Tokai (Japón)            |   | 100         |           |            |
| Kychtym (Rusia)          |   | 400         |           |            |
| Sellafield (RU)          | 1500  |             |           |            |
| Dounreay (RU)            |   |             | 10        |            |
| <b>Total</b>             | <b>2100</b>                                 | <b>1700</b> | <b>15</b> | <b>200</b> |



| País        | Proveedor                                      | Capacidad | Situación        |
|-------------|--|-----------|------------------|
| Alemania    | Siemens  | 25        | parada temporal  |
|             | Siemens  | 120       | terminada en 90% |
| Bélgica     | Belgonucléaire                                 | 35        | en explotación   |
|             | Belgonucléaire                                 | 40        | planificada      |
| Francia     | Cogema   | 15        | en explotación   |
|             | Framatome-Cogema                               | 120       | en construcción  |
| Japón       | Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp. | 10        | en explotación   |
|             | Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp. | 40        | planeada         |
|             | British Nuclear Fuels                          | 8         | en construcción  |
| Reino Unido | British Nuclear Fuels                          | 100       | planeada         |

Notas: Los datos se expresan en toneladas de metal pesado anuales. En relación con la capacidad, se supone que el contenido de plutonio del combustible MOX es 4,5% constante, excepto en el caso de la PNC del Japón que fabrica combustible con 2% de plutonio.

### Capacidades de fabricación de MOX para reactores de agua ligera en 1992

Para calcular los futuros inventarios de plutonio, el OIEA ha estudiado dos escenarios (*Véanse el recuadro y el gráfico de la página 41.*) En el primer escenario, en que se toman en cuenta las políticas nacionales de reelaboración, la tasa de separación de plutonio sigue siendo superior a su tasa de utilización hasta el año 2000 aproximadamente. En ese año, se calcula que los inventarios ascenderán a unas 170 toneladas de plutonio. Después del 2000, estos disminuirán a un ritmo de 7 a 10 toneladas anuales.

El segundo escenario, basado en los datos notificados al OIEA por los Estados Miembros, arroja resultados algo diferentes. En este escenario se parte de la hipótesis de que todas las plantas MOX y de reelaboración proyectadas funcionarán con arreglo al programa y a plena capacidad. En este caso, las reservas de plutonio aumentarán hasta 1997, en que alcanzarán unas 120 toneladas. Después del 2000 las existencias proyectadas disminuirán en unas 20 toneladas anuales.

### Tecnología del combustible MOX

La experiencia ha demostrado que el plutonio puede usarse como materia prima del combustible de mezcla de óxidos para los reactores de potencia moderados por agua. Los combustibles MOX pueden utilizarse particularmente en los reactores de agua ligera (LWR), que componen la mayoría de las centrales nucleares en explotación hoy día en el mundo. Varios países ya tienen planes de usar el combustible MOX. En Alemania, Bélgica, Francia y el Japón se han explotado con éxito instalaciones para fabricar el combustible MOX. Hay otras instalaciones en construcción y planificadas. (*Véase el cuadro.*)

Como los buenos resultados del combustible MOX han quedado demostrados en los conjuntos de ensayo, este combustible se está irradiando para obtener grados de quemado cada vez mayores. La viabilidad económica de los combustibles MOX depende del equilibrio que exista entre los precios

del uranio y de su enriquecimiento y los costos de fabricación, reelaboración, gestión de desechos y almacenamiento del combustible.

**Comportamiento del combustible MOX.** Desde hace más de 20 años, en Alemania, Bélgica, Francia y el Japón se vienen realizando pruebas con el combustible MOX que han demostrado que puede usarse sin peligro en los LWR existentes con un núcleo cargado hasta con un 30% de este combustible sin necesidad de realizar modificaciones importantes en los sistemas de control del reactor. La experiencia demuestra que entre el MOX y el combustible de dióxido de uranio no existen grandes diferencias desde el punto de vista del producto de la fisión y el comportamiento termomecánico con los grados de quemado del combustible ensayados hasta el momento. Sin embargo, hay diferencias (naturaleza del combustible, espectro neutrónico y perfil de la temperatura del combustible). Por consiguiente, se están realizando otros experimentos y exámenes de conjuntos de ensayo con combustibles que tienen un grado de quemado superior a los 35 megavatios-día por kilogramo de metal pesado (MWd/kg MP) para garantizar que el aumento de los grados de quemado no produzca efectos adversos.

En Alemania, Francia y el Japón se están realizando investigaciones sobre configuraciones de núcleo con miras a aumentar la carga de combustible MOX a niveles de entre 50% y el 100%. Sin embargo, para estos niveles se necesitaría una nueva generación de reactores de agua o modificaciones importantes en los sistemas de control de los reactores existentes.

En Alemania se ha diseñado y fabricado una amplia gama de conjuntos combustibles MOX para reactores de agua en ebullición y reactores de agua a presión. En la instalación de Hanau se han fabricado conjuntos combustibles MOX de distintos tipos que contienen 5,8 toneladas de plutonio fisionable. En esa ciudad también se ha terminado la construcción de una nueva planta de fabricación de combustible MOX con fines comerciales, que no ha comenzado a producir debido a problemas políticos. Se prevé que su capacidad anual aumentará gradualmente hasta llegar a 120 toneladas en el año 2000. En seis reactores de agua a presión y tres de agua en ebullición instalados en el país se ha irradiado combustible MOX en 70 000 barras de combustible de 490 conjuntos con un grado máximo de quemado de las pastillas de 53 MWd/kg MP.

En Francia, 16 reactores de agua a presión obtuvieron licencias para utilizar combustible MOX y se han entregado a siete reactores distintos 410 conjuntos combustibles MOX de diseño avanzado. El grado máximo de quemado de los conjuntos es de unos 39 MWd/kg MP con un grado máximo de quemado en las barras de 47 MWd/kg. Todos los conjuntos que han terminado los ciclos de irradiación han funcionado según lo previsto sin que se haya registrado una sola fuga de combustible en las barras. Además, en los últimos años se han fabricado principalmente en Bélgica más de 60 000 barras de combustible sin percarce alguno.

En el Japón se considera que el reciclado de uranio y plutonio en reactores térmicos es lo más acertado hasta que estén instalados los reactores reproductores rápidos comerciales. El Japón ha

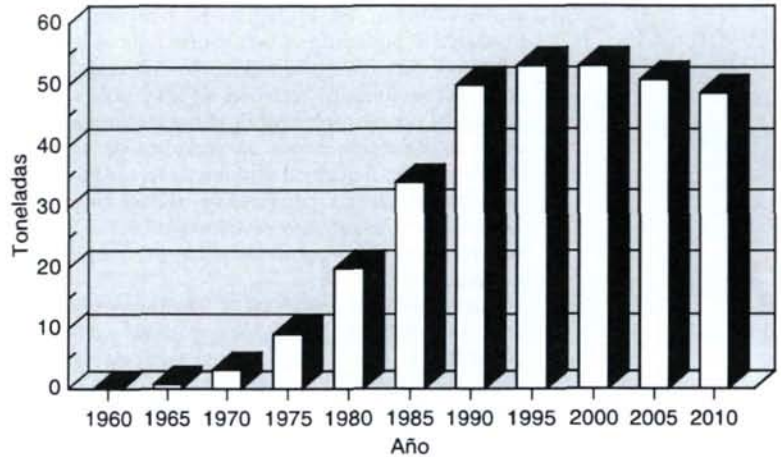
**Proyección de los suministros de plutonio**

El análisis del OIEA sobre la evolución de los inventarios de plutonio en los próximos decenios demostró que las estimaciones son objeto de gran incertidumbre. Se examinaron dos escenarios, cada uno basado en distintas hipótesis sobre políticas y planes nucleares nacionales. (Véase el gráfico *infra*.)

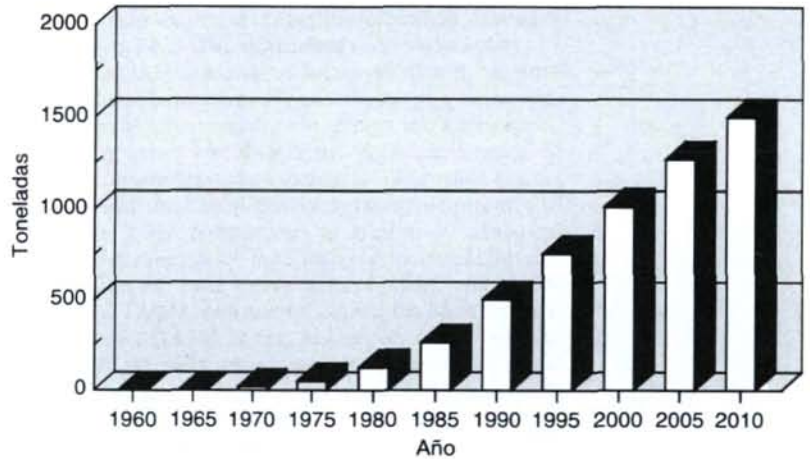
- En el primer escenario, las reservas proyectadas disminuirían gradualmente después del año 2000. En este caso se tuvieron en cuenta las políticas nacionales de reelaboración y se evaluaron las posibles capacidades de fabricación de combustible MOX. Al evaluar el MOX, sólo se consideraron los contratos y los proyectos en firme. No se consideró la ampliación de las plantas de combustible MOX de Francia. En el caso del Reino Unido, se partió de la hipótesis de que se construiría otra instalación MOX con una capacidad de 50 toneladas, que se ampliaría a 100 toneladas sólo si Alemania dejaba de aplicar su política de reciclado. En este escenario no se consideraron los inventarios de trabajo de las plantas MOX (que representan unos tres meses de utilización normal, o de tres a cuatro toneladas de plutonio). Estas hipótesis combinadas presentan una situación optimista. Debido a que una de las principales incertidumbres en estas proyecciones es la política de Alemania actualmente en revisión, se realizó un análisis de los posibles riesgos de que la política alemana cambie y se adopte la evacuación directa, la planta MOX de Hanau no funcione y Alemania deje de reelaborar el combustible en 1994. En este caso, la producción de plutonio y las tasas de utilización disminuyeron, pero no se observaron efectos significativos sobre la acumulación mundial total de plutonio.

- En el segundo escenario, las reservas proyectadas desaparecerían en 10 años aproximadamente. En este caso se partió del supuesto de que las plantas de reelaboración trabajarían a plena capacidad todo el tiempo y que todos los proyectos de plantas MOX propuestos entrarían en producción según el calendario actualmente establecido. Estas consideraciones están sujetas a algunas observaciones de carácter preventivo: 1) es probable que la hipótesis en que se usan todas las capacidades de reelaboración y las plantas MOX se construyen oportunamente sea optimista; 2) con arreglo a los contratos vigentes, no es seguro que después del año 2000 se utilicen a plena capacidad las plantas de reelaboración; y 3) si las instalaciones MOX no están listas a tiempo, quizás las empresas eléctricas deseen demorar la reelaboración debido a los problemas asociados al aumento de la actividad del plutonio separado y su almacenamiento. Todas estas hipótesis de conjunto ofrecen una perspectiva de acumulación poco optimista. Es muy probable que la presente situación esté a medio camino entre las dos hipótesis que plantean casos extremos.

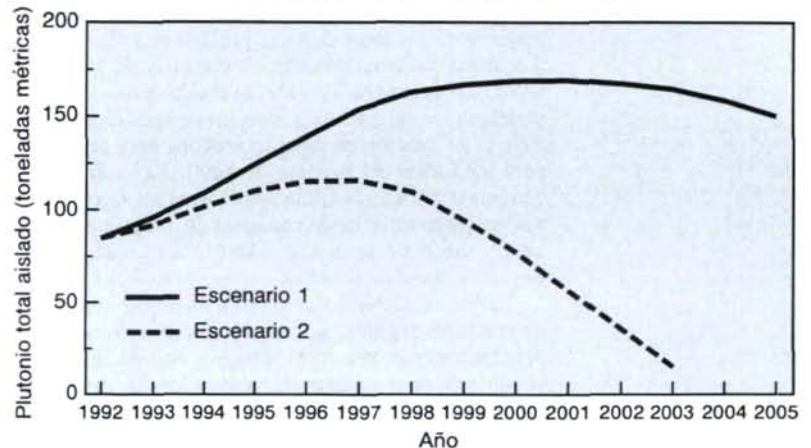
**Cantidad anual de plutonio fisionable en el combustible gastado**



**Cantidad acumulativa de plutonio fisionable en el combustible gastado**



**Inventarios totales proyectados de plutonio del sector civil al término del año**



decidido que el combustible MOX se fabrique en Europa, usando plutonio propiedad del Japón recuperado durante la reelaboración en Europa. En el futuro, el plutonio que se obtenga de la reelaboración en el país se utilizará en una instalación MOX que se prevé construir en el Japón. El plutonio que se produzca se utilizará en los reactores rápidos y en los reactores térmicos avanzados. No obstante, gran parte del plutonio se reciclará en los LWR. Cuatro conjuntos combustibles MOX cargados en reactores de agua a presión y dos en reactores de agua en ebullición han llegado al término de su vida útil con un comportamiento satisfactorio. (Véase en el presente número el artículo relacionado con las políticas del Japón en materia del ciclo del combustible nuclear.)

La experiencia con el MOX fabricado en Bélgica para los reactores de agua a presión ya llega a 70 MWd/kg MP y para los reactores de agua en ebullición a 49 MWd/kg MP. El comportamiento del combustible ha sido el esperado. Más de 100 000 barras de combustible MOX se han irradiado en 620 conjuntos combustibles cargados en tres reactores de agua en ebullición y 10 reactores de agua a presión. Las únicas fallas registradas desde 1980 han sido resultado del desgaste provocado por los desechos, que también afectó a los conjuntos combustibles de uranio normal de la misma planta.

**Fabricación de combustible MOX.** El combustible de mezcla de óxidos se ha consolidado comercialmente y ya desempeña una importante función en la industria del combustible nuclear. En Alemania, Bélgica, Francia, el Japón, el Reino Unido y Rusia se han construido instalaciones de combustible MOX o previsto su construcción: Bélgica tiene planes de comenzar a utilizar el combustible MOX en sus centrales nucleares a mediados del decenio de 1990. En el año 2000, Francia prevé tener 16 reactores cargados con conjuntos combustibles MOX. A partir de 1995, se prevé que la central MELOX de Marcoule comience a fabricar combustible MOX para Electricité de France. En Alemania, siete reactores ya están cargados con combustible MOX, y se prevé que en el año 2000 esta cifra aumentará a unos 20. La mayor parte de los conjuntos combustibles MOX para estos reactores deberá fabricarse en Hanau, mientras que el resto será suministrado por la central Belgonucleaire de Dessel, Bélgica.

En el Japón se están ejecutando programas en pequeña escala antes de hacer pruebas en gran escala y utilizar comercialmente el combustible en los LWR. La demostración en gran escala (con un cuarto del núcleo cargado en un reactor de agua en ebullición y un reactor de agua a presión) está prevista para mediados del decenio de 1990. La utilización comercial del combustible MOX (con un tercio del núcleo cargado en cinco reactores de agua en ebullición y cinco de agua a presión) está prevista para fines del presente decenio.

En Rusia, debido a la demora en la introducción de reactores rápidos, se está estudiando el reciclado del plutonio para reactores térmicos. Se está construyendo una nueva planta de fabricación de combustible MOX en el complejo Chelyabinsk, situada en la región meridional de los Urales. Esta planta, con una capacidad de 60 toneladas anuales de metal pesado, fabricará combustible MOX para reactores rápidos.

Sin embargo, se adaptará también para producir combustible MOX para los reactores térmicos WWER-1000. (Véase en el presente número el artículo sobre las políticas de Rusia en relación con el ciclo del combustible nuclear.)

Suiza ya está utilizando combustible MOX en sus dos centrales de Beznau, y en una o dos de las empresas eléctricas suizas se comenzará a reciclar plutonio en otros LWR a mediados del decenio de 1990. El combustible MOX para estas cargas será fabricado por Belgonucleaire y British Nuclear Fuels.

Desde el punto de vista de la investigación y el desarrollo, el combustible MOX seguirá recibiendo especial atención de las empresas eléctricas. Se estudiará más a fondo su comportamiento durante la irradiación en condiciones normales y anormales del reactor y con un quemado extendido con objeto de resolver los problemas técnicos y operacionales que pudieran surgir (por ejemplo, en relación con la temperatura y la liberación de gases de fisión) debido a las diferencias que existen entre el MOX y los combustibles normales de uranio. En estos estudios también se abordarán las innovaciones en materia de diseño que vayan surgiendo.

Alemania y Francia han acordado colaborar en el diseño de una nueva generación de reactores de agua a fin de perfeccionar el reciclado del plutonio. Debido al lento desarrollo de los reactores rápidos comerciales, el quemado del plutonio en reactores térmicos representa en la actualidad la única salida para la explotación del material fisionable recuperado durante la reelaboración.

### Gestión de los suministros futuros en condiciones de seguridad

A medida que aumenten los inventarios proyectados de plutonio separado, se tendrán que encontrar los medios de almacenarlos, administrarlos y utilizarlos en condiciones de seguridad. Varios países ya han acumulado una buena experiencia en la manipulación, el transporte y el almacenamiento del plutonio.

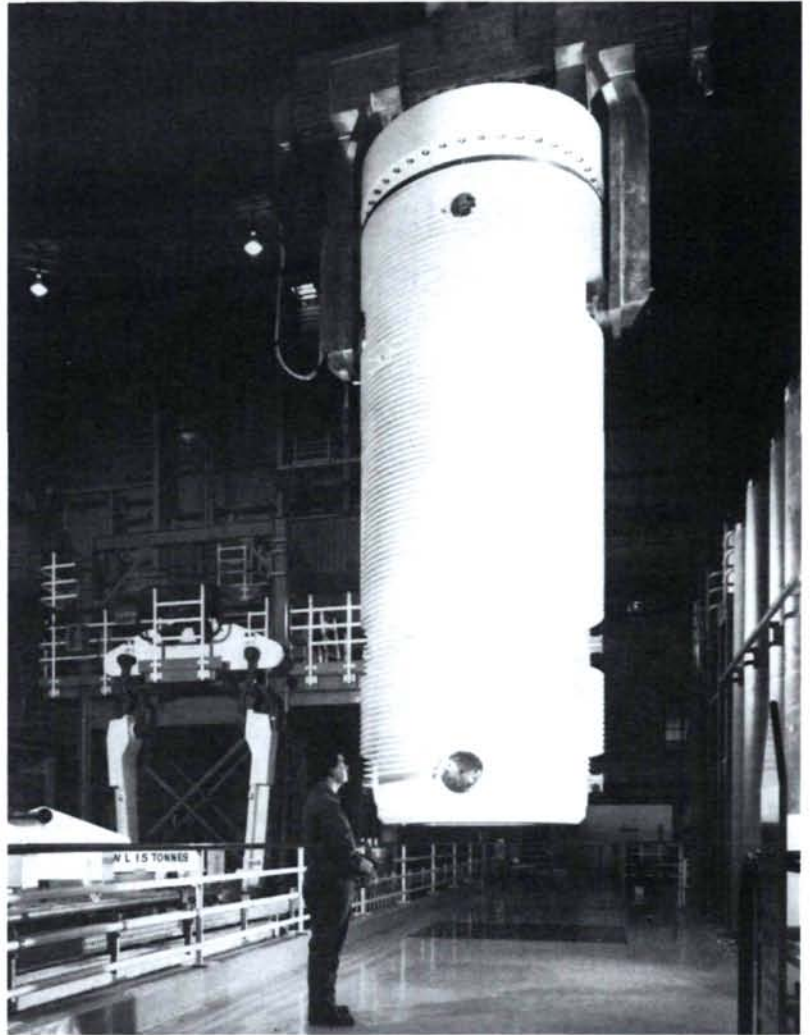
En los años venideros, el OIEA podría desempeñar diversas funciones en la promoción de una mayor y más eficaz cooperación internacional en cuestiones relacionadas con el plutonio. Por ejemplo, podría estudiarse la experiencia nacional para definir las esferas que deben ser perfeccionadas y formular una serie de recomendaciones sobre cuestiones tales como la protección física, la criticidad y la higiene radiofísica. Esta información podría publicarse con posterioridad en los documentos relacionados con la seguridad que abarcan la garantía de calidad y las normas de seguridad. Además, el OIEA podría ampliar su participación brindando orientación y en la aplicación de las recomendaciones internacionales que se formulen y supervisando su cumplimiento.

En relación con las innovaciones industriales, el OIEA podría promover intercambios entre los países con vistas a facilitar la investigación y el desarrollo del combustible de mezcla de óxidos. Uno de los obstáculos que entorpecen actualmente el uso del combustible MOX es la limitada capacidad de fabricación del combustible. Otro es la proporción de

combustible MOX relativamente baja que se carga en los núcleos de los reactores. En la actualidad se puede cargar un 30% de combustible MOX sin modificar la configuración del núcleo; sin embargo, los estudios han demostrado que para elevar esta cantidad al 100% sería preciso modificar la configuración del núcleo y aumentar la cantidad de barras de control.

El OIEA continuará tratando de determinar los inventarios de plutonio para reducir en la medida de lo posible las incertidumbres que afectan la proyección y la evaluación de las futuras existencias de plutonio. En el año 2000, aumentarán los inventarios de plutonio proyectados procedentes de la reelaboración en el sector civil, y disminuirán posteriormente. Hay gran incertidumbre sobre cuánto aumentarán las existencias de plutonio y por cuánto tiempo. Estas preguntas tienen mucho que ver con las hipótesis relativas a las tasas de reelaboración, y a las capacidades y las fechas de disponibilidad de las instalaciones para fabricar el combustible de mezcla de óxidos. Si no se construyen más instalaciones que las proyectadas en el presente, tendrán que transcurrir unos dos decenios para que las reservas de plutonio sean reabsorbidas en el ciclo de combustible.

A la luz del aumento de los suministros de plutonio, y de su posible uso en la fabricación de armamentos, crece el interés en relación con la implantación de un sistema internacional que permita administrar en condiciones de seguridad y salvaguardar los inventarios del sector civil. Tal sistema, en cuyo marco el OIEA desempeñaría un importante papel, podría brindar al público garantías de que las reservas de plutonio están debidamente salvaguardadas y administradas en condiciones de seguridad.



Interior de la instalación de Sellafield, Reino Unido, adonde se envía combustible gastado para su reelaboración. (Cortesía: BNFL)