

y que puedan servir de marco de referencia para el análisis de la seguridad y fiabilidad de dichas centrales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] "The Safety of Nuclear Power Reactors (Light Water Cooled) and Related Facilities", Informe WASH-1250 de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, julio de 1973.
- [2] "Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants", Informe WASH-740 de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, marzo de 1957.
- [3] "Rasmussen Study, ECCS, Standardization are First Day Topics", nota Nuclear Industry, enero de 1974, pág. 22.
- [4] OTWAY, H.J. y ERDMANN, R.C., "Reactor Siting from a Risk Viewpoint", Nuclear Engineering and Design, 13 (1970) págs. 365-376. North-Holland Publishing Co.
- [5] STARR, C., "Benefit-Cost Relationships in Socio-Technical Systems", memoria presentada en el Simposio sobre las centrales nucleares y el medio ambiente organizado por el OIEA en cooperación con la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos y celebrado en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York) del 10 al 14 de agosto de 1970. Publicación del OIEA STI/PUB/261, Viena, 1971, págs. 895-917.
- [6] OTWAY, H.J., LOHRDING, R.K. y BATTAT, M.E., "A Risk Estimate for an Urban-Sited Reactor", Nuclear Technology, Vol. 12, octubre de 1971, págs. 173-184.
- [7] STARR, C., GREENFIELD, M.A., HAUSKNECHT, D.F., "A Comparison of Public Health Risks: Nuclear vs Oil-Fired Power Plants", Nuclear News 15, octubre de 1972, págs. 37-45.
- [8] DUNSTER, J., "Costs and Benefits of Nuclear Power", New Scientist, 18 de octubre de 1973, págs. 192-194.
- [9] EKLUND, SIGVARD, "Energía nucleoelectrónica, seguridad nuclear y medio ambiente", en el presente número del Boletín.

La gestión de desechos y la energía nucleoelectrónica

por P.J. West

El objetivo primordial de la gestión de desechos es la protección del hombre y su medio ambiente. Cuando se trata de la gestión de desechos en la esfera de la energía nucleoelectrónica, es preciso tener en cuenta los procedimientos de todas las fases del ciclo del combustible nuclear.

El ciclo del combustible nuclear abarca las operaciones físicas y químicas necesarias para producir el combustible que se va a usar en el reactor, el funcionamiento del reactor para producir electricidad, y la reelaboración del combustible agotado para recuperar el material reutilizable. Las fases principales del ciclo del combustible son las siguientes:

- 1) Descubrimiento, extracción de su yacimiento y purificación de los materiales fértiles y fisionables existentes en la naturaleza;
- 2) Transformación de estos materiales en un compuesto químico adecuado para su enriquecimiento;
- 3) Elaboración de las combinaciones requeridas de materiales fisionables y fértiles, bien mediante ajuste isotópico, bien mediante mezcla por métodos físicos;

- 4) **Elaboración de la mezcla a fin de darle la forma y el revestimiento necesarios para su empleo en el reactor;**
- 5) **Funcionamiento del reactor para producir electricidad;**
- 6) **Separación y purificación de los materiales fisionables y fértiles no quemados que quedan en el combustible agotado, así como del material fisionable generado en el combustible durante el funcionamiento del reactor, para volverlos a utilizar.**

No todos los tipos de reactor requieren el mismo ciclo del combustible. Por ejemplo, algunos reactores moderados con agua pesada son alimentados con uranio natural, por lo que no se precisa el enriquecimiento isotópico ni la recuperación y reelaboración del combustible agotado. Algunos reactores refrigerados por agua pueden funcionar con plutonio y uranio-235 como material fisionable en los núcleos de recarga (es decir, el segundo núcleo y los sucesivos). Los reactores rápidos utilizan plutonio-239 así como uranio-235 y uranio-233 como material fisionable. No obstante, como los productos residuales de la fisión son análogos en todos los materiales fisionables, los problemas de gestión de desechos en la etapa de reelaboración del combustible son similares. Actualmente, el sistema que más se emplea en todo el mundo es el del reactor refrigerado por agua y alimentado con uranio ligeramente enriquecido.

La Fig. 1 ilustra el ciclo del combustible nuclear. En la primera fase, los minerales de uranio se extraen en minas subterráneas o a cielo abierto por métodos similares a los que se emplean para extraer muchas otras clases de minerales metalíferos. En general, los minerales de uranio son de baja ley; en los Estados Unidos, el contenido medio en uranio de los minerales es aproximadamente 0,25%. Para reducir al mínimo los gastos de transporte de estos minerales, las fábricas de uranio se sitúan en general a bocamina. En las fábricas, los minerales se trituran y muelen, y el uranio se extrae por lixiviación con ácidos. La fracción uranio se transforma generalmente en el óxido U_3O_8 y el resto del mineral, los llamados residuos de fabricación, se desechan.

RESIDUOS DE FABRICACION

Como el peso del uranio extraído del mineral es relativamente pequeño, la radiactividad de los residuos es casi la misma que la del propio mineral. Anualmente se producen unas 91 000 toneladas de residuos para obtener el uranio que necesita un reactor LWR de 1 000 MW(e). En los Estados Unidos, la concentración en los minerales de uranio del radio-226, el producto descendiente de mayor interés, por su largo período y su elevada radiotoxicidad específica, alcanza un promedio de 800 picocuries por gramo. Esto equivale a menos de una parte por mil millones en peso. Como los minerales se muelen en el proceso de fabricación hasta reducirlos al tamaño de una arena bastante fina, las escombreras de residuos son erosionadas por el viento. Pero, al ser la concentración radiactiva tan reducida, el efecto principal de esta erosión es la molestia que causa el polvo. El objetivo principal de la gestión de desechos es en este caso reducir al mínimo tal molestia. Las fábricas de uranio suelen estar situadas en regiones de escasa lluvia, por lo que es necesario rociar los residuos con agua para evitar el polvo. Se levantan diques para impedir la posible escorrentía hacia los cursos de agua próximos y evitar que las crecidas ocasionales de estos últimos erosionen las escombreras. En algunos casos, tras el cierre de las fábricas, se han explanado las escombreras, se han cubierto con una capa de tierra fértil y se ha creado una vegetación que se mantendrá por sí sola. Una vez estabilizados así los residuos, las materias radiactivas que contienen, exceptuando quizás el radón, se encuentran con respecto al medio ambiente en situación similar a la de los minerales próximos a la superficie que todavía no se han explotado.

El radón es el primer descendiente del radio-226 que, como ya se ha dicho, constituye el radionúclido de más interés en los residuos de fabricación. Como el radón es un gas, puede escapar de los materiales que contienen radio. La emanación de radón de las escombreras, con o sin capa de tierra vegetal, es tan pequeña que a pocos cientos de metros no es posible detectar incremento alguno de la concentración natural del radón. No obstante, existe acuerdo general en que, debido a las emanaciones de radón, los residuos de fabricación de uranio no deben utilizarse en materiales estructurales o de relleno para edificios destinados al uso humano y, análogamente, tales edificios no deben construirse sobre las escombreras. Esto implica la necesidad de vigilar las escombreras durante miles de años.

Volviendo al ciclo del combustible, los concentrados de la fábrica se envían a una refinería donde el uranio se extrae con un disolvente orgánico y se convierte, calentándolo, en trióxido de uranio (UO_3) prácticamente puro. Este material sigue teniendo su composición isotópica natural de 0,7% de uranio-235 y 99,3% de uranio-238. Como muchos reactores están concebidos para funcionar con un combustible más rico en uranio-235, la próxima fase del ciclo del combustible es el enriquecimiento isotópico.

ENRIQUECIMIENTO

El método de enriquecimiento más generalizado es el de difusión gaseosa, para el cual se emplea como materia prima hexafluoruro de uranio (UF_6), obtenido tratando trióxido de uranio con fluoruro de hidrógeno y flúor. El hexafluoruro de uranio es un sólido a la temperatura ambiente, pero se transforma en gas calentándolo; este gas se hace pasar a través de numerosas barreras porosas y, como la velocidad de difusión del uranio-235 es ligeramente superior (debido a su menor peso molecular), se consigue un enriquecimiento apreciable en este isótopo. El uranio residual, consecuentemente empobrecido en uranio-235, no constituye un desecho sino que se almacena en la planta de difusión para posibles usos futuros. Los problemas de gestión de desechos en las plantas de enriquecimiento giran casi enteramente en torno a los residuos químicos no radiactivos, y las rigurosas medidas para reducir al mínimo las pérdidas de uranio durante el proceso de difusión gaseosa sirven también para minimizar los residuos no radiactivos resultantes. Los principales contaminantes gaseosos o en suspensión en el aire proceden de las calderas clásicas empleadas para producir el calor industrial necesario. Los desechos líquidos son en particular amoniaco, cloruros, fluoruros y nitratos resultantes de las operaciones de limpieza y auxiliares

En los desechos líquidos las impurezas se presentan en concentraciones muy reducidas. En los Cuadros 1 y 2, respectivamente, se indican los desechos no radiactivos de una planta típica de transformación en UF_6 que opere por vía seca o húmeda, así como los de un complejo de enriquecimiento de uranio. Es difícil predecir la producción de desechos radiactivos resultantes del enriquecimiento de uranio y la fabricación de combustible. Si bien la cantidad de combustible fabricado dependerá de la potencia nuclear instalada, varios otros factores influirán tanto en la producción de desechos radiactivos que no es posible establecer una relación entre esta producción y la cantidad de combustible fabricado. Entre esos factores cabe señalar las innovaciones en la tecnología de la fabricación del combustible y en los procesos de enriquecimiento de uranio. De reciclarse, como es probable, el plutonio en los reactores de agua ligera, el contaminante más significativo, en los desechos generados por las fábricas de combustible, será, por su elevada toxicidad y su período excepcionalmente largo de 24 000 años, el plutonio-239.

La radiactividad inducida por captura neutrónica es la principal causa de formación de desechos radiactivos durante el funcionamiento de los reactores de potencia. Ahora bien, en el reactor, dentro de los propios elementos combustibles, se generan

CUADRO 1. Plantas de transformación en UF₆ – Efluentes no radiactivos (en toneladas métricas año) por cada 5 000 toneladas métricas de uranio/año.

Componentes	Proceso de hidrofluoración por vía seca		Proceso por vía húmeda	
	Proceso	Combustión ¹	Proceso	Combustión ¹
Gases y materias suspendidas en el aire				
SO _x		0,1	18	0,4
NO _x		25,0	60	75,0
Hidrocarburos		5,0		15,1
Flúor y fluoruro	1,2		1,2	
<u>Líquidos</u>				
Sulfato	225		22,5	
Nitrato			6	
Fluoruro	481		5	
Cl ⁻	9		3,3	
Na ⁺	52		6,7	
NH ₃	86		-	
Fe	2		0,5	
K	127		-	
<u>Sólidos</u>				
Fluoruro en CaF ₂	250 ²⁾		400	
1) Del gas natural quemado para obtener el calor industrial				
2) Material del lecho de CaF ₂				

cantidades mucho mayores de desechos, pero el problema de su gestión no surge sino en la planta de reelaboración de combustible.

Los materiales estructurales del reactor y del equipo que extrae el calor del núcleo se corroen y erosionan muy lentamente con el tiempo, pero lo suficiente para originar partículas llamadas en general productos de corrosión. Estos productos y otras impurezas del refrigerante circulan a través del núcleo del reactor, donde capturan neutrones y adquieren radiactividad. Las cantidades de materias radiactivas formadas de esta manera son pequeñas en comparación con los productos de fisión, y consisten por lo general en radioisótopos de elementos tales como el hierro, el cobalto y el manganeso. Algunos reactores tienen boro en el núcleo y en el refrigerante para controlar el proceso de fisión. La absorción de neutrones por el boro origina la formación de tritio, un radioisótopo del hidrógeno. También puede formarse tritio, cuando se emplea agua como refrigerante, por conversión del deuterio, un isótopo natural del hidrógeno presente en el agua. En los reactores refrigerados por anhídrido carbónico, entre los productos de activación figuran el argón-41 y el carbono-14.

CUADRO 2. Complejo de enriquecimiento isotópico – Efluentes no radiactivos (en toneladas métricas/año) por cada 10 500 toneladas métricas de unidades de trabajo de separación/año.

Componentes	Cantidad toneladas métricas/año	Concentración mg/l
<u>Gases y materias suspendidas en el aire</u>		
SO _x	740	
NO _x	1390	
Fluoruros	45	
<u>Líquidos</u>		
Amoniaco	16	1,0
Cloruros	150	9,0
Fluoruros	16	1,0
Hierro	36	2,0
Nitratos	240	15,0

EFFLUENTES

Aunque los desechos radiactivos resultantes del proceso de fisión son fundamentalmente los mismos en todos los reactores alimentados con uranio, las características de los efluentes de las centrales nucleares pueden variar apreciablemente según el refrigerante del reactor y los ciclos del vapor. Los radioisótopos contenidos en los efluentes influyen a su vez en la concepción de los sistemas de tratamiento de desechos. Al proyectar las instalaciones, se procura organizar el tratamiento y reciclado de los desechos de forma que se reduzca en todo lo posible el volumen y la radiactividad de los efluentes. Las descargas de desechos en el medio ambiente se controlan tratando los efluentes por lotes y midiendo su radiactividad antes de descargarlos, para tener la seguridad de que no se rebasan los límites admisibles establecidos.

En los sistemas de gestión de desechos líquidos se siguen cuatro métodos básicos para reducir los niveles de radiactividad. Son éstos la espera hasta el decrecimiento radiactivo, la filtración, la evaporación, y el intercambio iónico.

El método de la espera consiste en almacenar los desechos por tiempo suficiente para que decrezca la radiactividad. Es de interés sobre todo para los radioisótopos de período corto. Los métodos de gestión aplicados a los desechos gaseosos son la espera hasta el decrecimiento radiactivo, la filtración, y la absorción a baja temperatura en carbón vegetal. La utilidad de la espera como medio para reducir la actividad de los desechos gaseosos depende de los isótopos que éstos contengan. Seguidamente, los gases se filtran y se expulsan por chimeneas a la atmósfera. Los filtros captan las partículas radiactivas que se forman por desintegración de algunos núclidos gaseosos o cuando éstos se adhieran a corpúsculos sólidos; esas partículas también pueden ser de polvo arrastrado por el aire que circula por el núcleo del reactor. El yodo se puede extraer con lechos filtrantes de carbón vegetal tratado especialmente. Los desechos sólidos que se producen pueden consistir en equipo nuclear usado que contenga radiactividad inducida por captura neutrónica, filtros usados de partículas, procedentes de los sistemas de



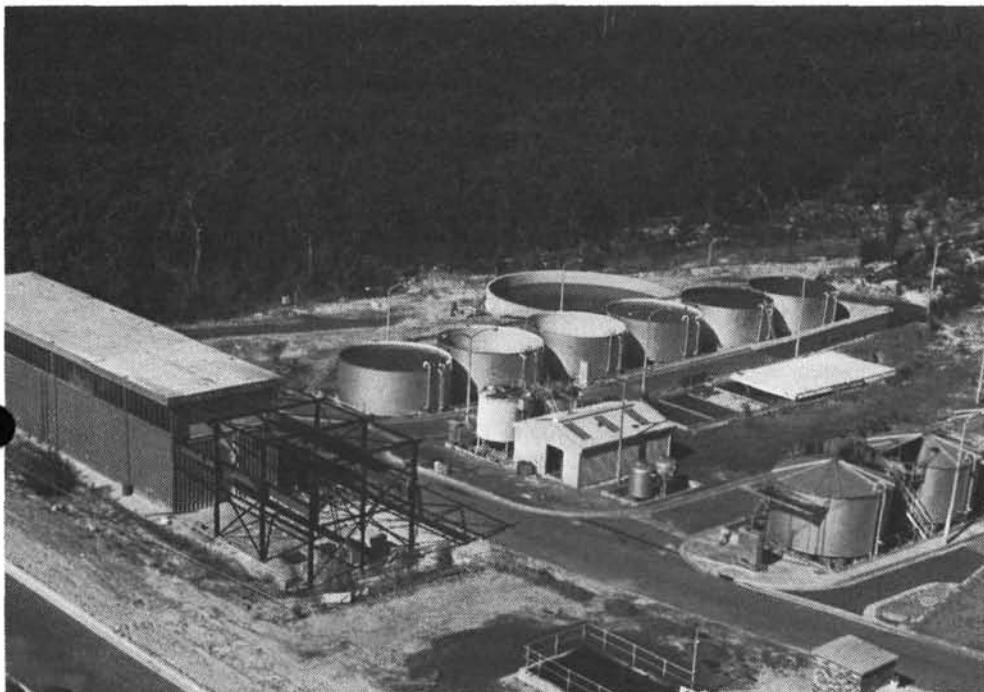
Camiones saliendo de la antigua mina de sal Asse 11, en el norte de Alemania, que la República Federal utiliza como almacén subterráneo para sus desechos de radiactividad baja e intermedia.

ventilación, precipitados, lodos, resinas de intercambio iónico que contengan sustancias radiactivas como resultado del tratamiento de efluentes líquidos, y ropa protectora u otros materiales usados, necesarios para la seguridad de los trabajadores o para prevenir la contaminación. En general, los problemas de gestión de desechos radiactivos derivados del funcionamiento de los reactores son relativamente fáciles si se comparan con los que origina la reelaboración del combustible nuclear. Ahora bien, existe otro desecho resultante del funcionamiento de los reactores que causa preocupación por sus posibles efectos sobre el medio ambiente; se trata del calor residual.

CALOR RESIDUAL

Ningún método de transformación del calor en electricidad aprovecha íntegramente el calor disponible. Las turbinas de vapor modernas, que funcionan con combustibles fósiles y vapor a alta presión y temperatura, alcanzan rendimientos térmicos del 40% o más, y en esas instalaciones una parte del calor remanente sale a la atmósfera con los gases de escape. En las centrales nucleares, prácticamente todo el calor remanente se disipa con el agua de refrigeración. A resultas de ello, una central nuclear cuya agua refrigerante no pase más que una vez por los circuitos de refrigeración, descargará aproximadamente el 50% más de calor residual que una planta central de combustible fósil de la misma potencia. Se espera que los reactores avanzados futuros, refrigerados por gas o por metal líquido, alcancen un rendimiento térmico superior.

Es indudable que la descarga de calor residual en el agua puede modificar el medio acuático. Aparte de los efectos de la temperatura en el agua que recibe esa descarga, también pueden perturbar la ecología acuática las alteraciones de la cadena alimentaria



Planta de tratamiento de desechos de baja radiactividad instalada en el Centro de Investigaciones Nucleares de Lucas Heights, de la Comisión Australiana de Energía Atómica. Foto: AAEC

debidas a daños en la biota por «shock» mecánico o térmico al pasar el agua de refrigeración por el sistema de condensadores. El conocimiento de las formas de vida presentes en las aguas que reciben la descarga, combinado con el empleo de técnicas para reducir al mínimo los efectos del calor residual, puede permitir a las centrales nucleares cumplir las normas relativas a la calidad del agua. Si no se dispone de caudal suficiente para satisfacer estas normas con una sola pasada del agua refrigerante, será preciso prever otros sistemas como torres o estanques de enfriamiento que permitan utilizar el agua de refrigeración y, con ello, reducir a límites aceptables los efectos del calor residual. De todas formas, las grandes torres de enfriamiento también tienen sus efectos sobre el medio ambiente, no sólo por sus aspectos estéticos sino por la formación de nieblas bajas, nubes y precipitaciones, sombras y efectos concomitantes al mezclarse sus emanaciones con otras emanaciones industriales que contengan óxidos de azufre y de nitrógeno.

REELABORACION DEL COMBUSTIBLE

En la última fase del ciclo del combustible nuclear, la reelaboración del combustible irradiado, se generan más del 99% de todos los desechos radiactivos que origina la producción de electricidad nuclear.

Los productos de fisión se acumulan en los elementos combustibles dentro del reactor, llegando a absorber los neutrones en un grado tal que perturban el proceso de fisión. En consecuencia, los elementos combustibles se extraen del reactor mucho antes de haberse agotado todo el combustible utilizable, y se envían a las plantas de reelaboración. El objetivo principal de la reelaboración es la recuperación eficiente en

condiciones de seguridad del plutonio (que se produce en el reactor) y del uranio no quemado de pureza suficiente para volver a utilizarlo en el ciclo del combustible.

Al examinar los problemas de gestión de desechos resultantes de la reelaboración del combustible, será útil resumir las principales operaciones de forma que se puedan apreciar claramente los orígenes de los diversos desechos:

- 1) A veces son necesarias operaciones de desmontaje, que se ejecutan a distancia, para separar las partes externas de los conjuntos combustibles irradiados antes de comenzar la reelaboración. Esto origina gran cantidad de desechos metálicos que, debido a la activación neutrónica en el reactor, suelen ser radiactivos.
- 2) El desvainado de algunos combustibles, especialmente de los de uranio metálico, se efectúa bien por disolución química de las vainas, bien por un proceso mecánico. El proceso de disolución produce un efluente líquido, mientras que el proceso mecánico produce desechos sólidos en forma de recortes metálicos. En ambos casos la radiactividad de las vainas, causada principalmente por difusión en ellas de los productos de fisión del combustible y por activación neutrónica, da lugar a la formación de desechos radiactivos.
- 3) Otros combustibles, especialmente los consistentes en óxido de uranio, se cizallan y cortan en pequeños trozos que caen a una cuba de disolución. Esta operación puede liberar pequeñas cantidades de efluentes gaseosos, en particular gases nobles productos de fisión radiactivos.
- 4) Después de desvainarse los combustibles mecánicos y de trocearse los combustibles en forma de óxido, se disuelven generalmente en soluciones acuosas ácidas hirvientes. Esto produce un efluente gaseoso que contiene productos de fisión radiactivos como son los gases nobles criptón y xenón, además de yodo. Algunas veces se disuelven enteramente el combustible y las vainas, pero lo más frecuente es disolver solamente el óxido de uranio irradiado, quedando las vainas metálicas lixiviadas como desecho radiactivo que ha de evacuarse.
- 5) El tratamiento químico consiste en una serie de operaciones de extracción por disolventes y, a veces, de intercambio iónico, con etapas intermedias de acondicionamiento químico. Al principio, la mayor parte de los productos de fisión se separa del uranio y del plutonio, lo que origina desechos en solución de alta radiactividad, que es preciso almacenar de una manera u otra después de tratarlos y concentrarlos. En las etapas sucesivas de la recuperación de los dos productos principales, el uranio y el plutonio, se originan una serie de efluentes líquidos que contienen un pequeño resto de productos de fisión y vestigios de uranio y plutonio. También se producen en estas operaciones desechos sólidos como resinas de intercambio iónico, filtros usados, etc., de actividad moderada.

Tras este breve resumen de los orígenes y tipos de desechos radiactivos resultantes de la reelaboración del combustible, conviene también mencionar los desechos no radiactivos, dados sus posibles efectos sobre el medio ambiente. En el **Cuadro 3** se indican los desechos no radiactivos típicos de una planta de reelaboración con una capacidad de producción de 900 toneladas métricas/año de uranio.

SOLIDOS, LIQUIDOS Y GASES

Al examinar a continuación la gestión y el control de los desechos radiactivos se distinguen los tres grandes grupos siguientes de desechos: sólidos, líquidos y gases.

Los principales desechos sólidos son las piezas metálicas, los recortes de las vainas y los trozos lixiviados del revestimiento del combustible. Estos desechos suelen ser demasiado

CUADRO 3. Planta de reelaboración de combustible — Efluentes no radiactivos (toneladas métricas/año)

Componentes	toneladas métricas/año
<u>Gases y materias suspendidas en el aire</u>	
SO _x	160
NO _x	185
Hidrocarburos	0,5
Fluoruro	28
<u>Líquidos</u>	
Na ⁺	137
Cl ⁻	6,3
SO ₄ ⁼	11,3
NO ₃	21,6

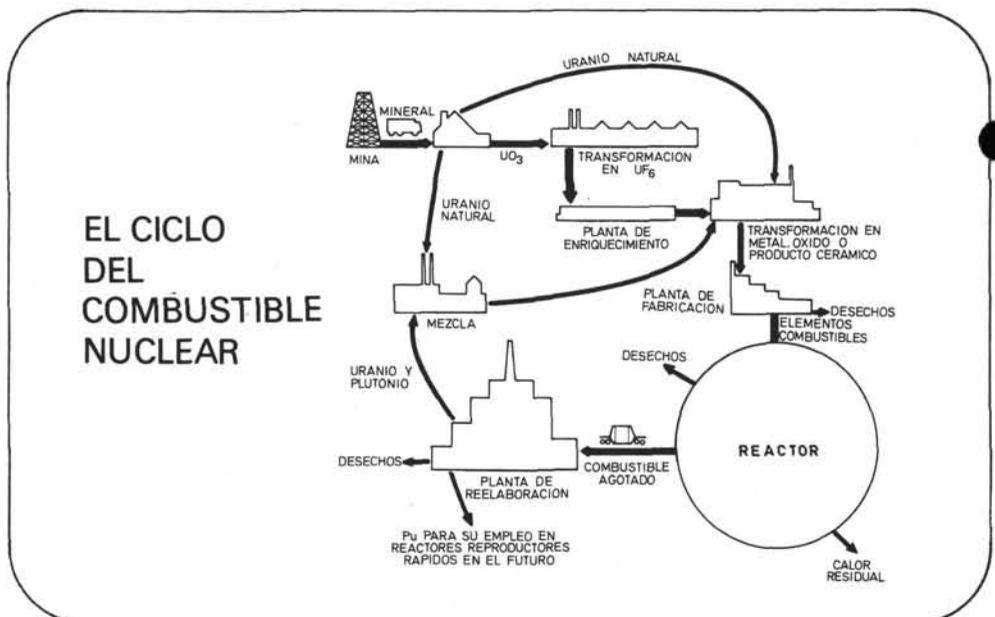
radiactivos para evacuarlos sencillamente enterrándolos, aunque este procedimiento ha sido adoptado en algunas instalaciones donde se ha comprobado la existencia de estratos geológicos suficientemente impermeables. Más corriente es almacenarlos en depósitos de hormigón a pie de fábrica, concebidos y dispuestos de manera que sea posible sacar los desechos para evacuarlos definitivamente tras un período muy largo de decrecimiento radiactivo. Otros desechos sólidos, tras medirse su radiactividad, se dividen según los tipos, por ejemplo, en combustibles o no combustibles, de baja actividad o de actividad intermedia. Para estos desechos se han adoptado en los diversos países métodos muy variados de evacuación. Los de actividad reducida se entierran en grandes zanjas a pie de fábrica; en este caso la radiactividad de período largo se limita de forma que sea posible abandonar en su día el terreno sin ninguna precaución. Para comprobar que el procedimiento es seguro se mide regularmente la radiactividad del agua infiltrada procedente del terreno. Otro método de evacuación de desechos sólidos de baja actividad, que se emplea en algunos países, es la evacuación en el mar en condiciones rigurosamente especificadas; los desechos se meten en recipientes metálicos embebidos en bloques de hormigón y se hunden en determinadas zonas del océano, de profundidad no inferior a 2 700 metros. Esta operación se ejecuta con frecuencia en cooperación entre varios países. Algunas veces se incineran los desechos combustibles, teniendo especial cuidado de limpiar por lavado y filtrado los productos gaseosos de la combustión. La ceniza resultante puede someterse a un tratamiento químico de recuperación, o almacenarse sin muchos gastos debido a su pequeño volumen. En general, los desechos sólidos de intensidad media se almacenan durante largo tiempo para que decrezca su actividad.

Los principales desechos gaseosos, en la reelaboración, provienen del troceado del combustible en forma de óxido, de las operaciones de disolución del combustible, y del aire de ventilación de instalaciones tales como los depósitos de líquidos de alta actividad. Puede haber sustancias radiactivas en forma de partículas o en suspensión, así como de yodo-131, yodo-129 y gases nobles radiactivos como el cripton-85. Invariablemente, el combustible se almacena antes de reelaborarlo durante tiempo suficiente para que se desintegre la mayor parte del yodo-131 (período corto, 8 días), por lo que este

radionúclido no suele presentar ningún problema importante; de todas maneras, se emplean filtros de absorción especiales para el radioyodo. Las sustancias radiactivas en forma de partículas en suspensión se reducen al mínimo con equipo especial, en particular, lavadores de gases y filtros. Finalmente la expulsión a la atmósfera se hace por chimeneas altas provistas de equipo de vigilancia que registra los grados de radiactividad y los caudales, de forma que permite conocer la actividad de los gases descargados y tener constancia de la misma. Como última comprobación, en casi todas las plantas de reelaboración se desarrolla un programa de vigilancia radiológica del medio ambiente en la zona circundante, con frecuencia en un radio de varios kilómetros. Las muestras que se toman y examinan son en particular las que pueden indicar una eventual exposición de la población en general, por ejemplo, muestras de leche para determinar el radioyodo y el radioestroncio contenidos.

En la reelaboración se producen tres clases principales de desechos líquidos: los de baja actividad, por ejemplo, el agua de los tanques donde se almacena el combustible, los condensados de los evaporadores y muchos efluentes de la planta; los de actividad media como son los resultantes del desvainado químico, y algunos efluentes de la planta; los de alta actividad, que contienen la mayor parte de los productos de fisión (en general más del 99,9%).

Las grandes plantas de reelaboración producen al día varios metros cúbicos de desechos acuosos de baja actividad. Después de un tratamiento, que puede variar desde el simple almacenamiento para permitir el decaimiento radiactivo, hasta un proceso químico complejo, estos desechos suelen hundirse en ríos o en el mar, en condiciones rigurosamente prescritas, de conformidad con las normas establecidas. Los desechos de actividad media son de composición muy variable pero, en general, contienen cantidades importantes de sales disueltas. Se tratan por varios métodos combinados: evaporación (pasando el concentrado al depósito de desechos de alta actividad; almacenamiento en espera de la disminución radiactiva, y precipitación (los lodos decantados pasan a engrosar los desechos sólidos). De este modo, la mayor parte de estos residuos se transforma en desechos líquidos de baja actividad.



CUADRO 4. Cantidades anuales estimadas de desechos sólidos que contengan productos de fisión

Desechos sólidos	1000 MW(e) LWR	1000 MW(e) LMFBR
<u>Producidos en el reactor</u>		
<u>Baja actividad</u>		
Metros cúbicos/año	56 - 110	28 - 56
Kilogramos/año	60,000 - 100,000	30,000 - 50,000
Recipientes de 240 l/año	270 - 540	135 - 270
Superficie de almacenamiento – metros cuadrados/año	165 - 330	83 - 165
<u>Producidos en la planta de reelaboración</u>		
<u>Vitrificados, de alta actividad</u>		
Metros cúbicos/año	2,5	2,0
Kilogramos/año	5000	4000
Recipientes de 150 l/año	60	40
Superficie de almacenamiento – metros cuadrados/año	1100	750
<u>Vainas</u>		
Metros cúbicos/año	1,7	5,5
Kilogramos/año	7600	30,000
Recipientes de 150 l/año	15	50
Superficie de almacenamiento/año	a	a
<u>Sólidos, de baja actividad</u>		
Metros cúbicos/año	17 - 115	56 - 340
Kilogramos/año	30,000 - 65,000	100,000 - 200,000
Recipientes de 250 l/año	80 - 540	270 - 1600
Superficie de almacenamiento – metros cuadrados/año	93 - 460	185 - 930
<u>Producidos en la planta de fabricación de combustible</u>		
<u>Desechos contaminados por Pu</u>		
Metros cúbicos/año	340 ^b	230
Recipientes de 250 l/año	1500 ^b	1000
Volumen de almacenamiento – metros cúbicos/año	600 ^b	400

^a Varía según que el lugar de almacenamiento sea de una empresa privada o del Estado.

^b Suponiendo que el plutonio sea reciclado.

Los desechos de alta actividad contienen casi todos los productos de fisión generados en los reactores de potencia que, después de la reelaboración, se encuentran en forma de nitratos en solución acuosa. La composición de los desechos varía según los reactivos empleados en el proceso, y también según que el combustible se haya extraído de las vainas por lixiviación o se hayan disuelto por completo vainas y combustible. Invariablemente, la primera etapa del tratamiento es la concentración por evaporación, pero el grado de concentración varía considerablemente según el procedimiento empleado. Si sólo se han añadido pequeñas cantidades de sales y no se han disuelto las vainas, se logra una reducción de volumen de unos 50 litros por tonelada de uranio combustible, pero en muchas plantas se llega a volúmenes de 450 a 900 litros por tonelada de combustible. Este licor altamente activo se almacena en tanques de acero de paredes gruesas contenidos en celdas de hormigón de hasta 1,5 m de espesor, forradas a su vez de acero. Para disipar el calor de desintegración de los productos de fisión los tanques se proveen de serpentines de refrigeración y, a veces, de medios (por ejemplo, chorros de aire) para mantener en suspensión los sólidos. Se prevén tanques de reserva para recoger el contenido de algún tanque que se averíe. Si bien se considera satisfactorio desde el punto de vista de la seguridad almacenar estos concentrados líquidos en tanques de esta clase durante muchos años, también se acepta casi universalmente que es preferible almacenarlos en forma de sólidos. Como ya se ha dicho, los distintos procesos dan lugar a diferentes desechos líquidos de alta actividad, y las diversas técnicas de solidificación que se han ideado son más apropiadas para algunos desechos que para otros.

En general, todos los procesos de solidificación consisten en calentar los desechos a temperaturas de 400° a 1 200°C, lo que elimina todos los componentes volátiles, principalmente agua y nitratos, dejando un sólido calcinado o una mara fundida que, al enfriarse, se solidifica. En la mayoría de los casos se añaden fundentes para obtener productos vítreos. Lo ideal sería que los desechos solidificados fueren buenos conductores del calor, resistentes a la acción de los líquidos, muy estables químicamente y fuerte a las radiaciones, y poseyeran buena resistencia mecánica. Una vez solidificados los desechos tienen que ser contenidos de forma adecuada. Probablemente será necesario almacenarlos temporalmente en el lugar de la planta de reelaboración y de solidificación, con el fin de permitir que decaiga en gran parte la actividad de los radionúclidos de período corto o intermedio. Para disipar el calor proveniente de la desintegración radiactiva, las instalaciones de almacenamiento han de estar dotadas de medios de refrigeración por aire o por agua. En algunos países se está estudiando la evacuación definitiva de los desechos solidificados en formaciones geológicas profundas, por ejemplo, en domos salinos. La tecnología actualmente aplicable en la reelaboración del combustible irradiado no permite separar cuantitativamente los actínidos de los productos de fisión, de forma que los desechos contienen algunos radionúclidos de período largo como el plutonio-239 (período de 24 000 años). Esto significa que los desechos solidificados que actualmente se obtienen partiendo de concentrados de alta actividad tendrán que ser aislados del medio ambiente humano durante muchos miles de años.

El Cuadro 4 indica las cantidades de desechos radiactivos originadas anualmente por cada 1 000 MW(e) de potencia, en el caso de los LWR, (reactores de agua ligera) que serán los predominantes por lo menos hasta 1990. Como el tipo de reactor más extendido después de 1990 será el LMFBR (reproductor rápido refrigerado por metal líquido), se indican también, con fines comparativos, las cantidades resultantes de cada 1 000 MW(e)/año, en el caso de los reactores LMFBR.

Se reconocen los problemas que plantea la gestión de estos desechos de alto nivel y se examinan atentamente todas las novedades en la materia. Las técnicas que finalmente se

empleen no se seleccionarán sino después de tener la seguridad de que se ha logrado un equilibrio adecuado entre una probabilidad suficientemente grande de éxito y los riesgos que sean de prever.

El riesgo total en la gestión de desechos radiactivos es la suma de los riesgos que surgen en cada fase del proceso. La finalidad principal es reducir el riesgo total al límite más bajo posible. En consecuencia, las etapas seguidas en los programas de gestión de desechos pueden diferir de un país a otro, según la magnitud de los riesgos inherentes a cada proceso utilizado.

La central nuclear de Wylfa en Aglesey, Gales del Norte, que en 1973 obtuvo una mención honorífica en el concurso del Financial Times para premiar un trabajo destacado de arquitectura industrial. La central eléctrica figuró entre los seis finalistas del concurso. En su informe sobre ella, el jurado comentó: «Esta obra testimonia un sentido extraordinariamente fino de adaptación a un paisaje costero de gran belleza. Gracias a la precaución y al cuidado de los arquitectos y paisajistas, la mole de una central nuclear ha resultado casi una ventaja y no una catástrofe. Los gigantescos edificios muestran una unidad y simplicidad que en cierto modo armoniza con la calidad del paisaje, a lo que contribuye el uso discreto de los colores y la originalidad de las formas».

