

# Gestión de desechos radiactivos

Por William L. Lennemann

Los elementos radiactivos (radionucleidos) no pueden ser destruidos por ningún procedimiento conocido, ya sea químico o mecánico. Su destrucción final se produce por desintegración radiactiva, que los convierte en isótopos estables, o por transmutación nuclear al ser bombardeados con partículas atómicas. En consecuencia, la gestión de desechos radiactivos consiste en controlar las descargas radiactivas y reducirlas a límites tolerables, eliminando de efluentes y desechos los radionucleidos que interesen, concentrándolos de forma que puedan ser almacenados o evacuados de modo que posteriormente no aparezcan en concentración peligrosa en la biosfera.

Serían necesarios libros enteros para tratar de los diversos aspectos de la llamada gestión de desechos radiactivos y explicar las tecnologías que para ello se emplean. Por lo tanto, en un artículo de boletín sería vano esperar algo más que una breve mención de los progresos realizados en esta esfera de la gestión de desechos radiactivos. En este informe se omitirán sin duda no pocos aspectos de la situación actual. No obstante, es de esperar que estas líneas sirvan para indicar que los científicos, ingenieros y técnicos que trabajen en las operaciones que comprenden el ciclo del combustible cumplen y seguirán cumpliendo los requisitos tecnológicos que exige tal gestión, en condiciones de seguridad, de desechos contaminados con radionucleidos.

## PRINCIPIOS BASICOS

En la gestión de desechos radiactivos se aplica uno de dos métodos fundamentales: o bien los materiales radiactivos pueden liberarse o descargarse en el medio ambiente, o bien deben confinarse y aislarse de la biosfera hasta que los radionucleidos perjudiciales queden desintegrados y reducidos a concentraciones inofensivas.

La liberación de radiactividad en el medio ambiente tiene lugar en general en forma de desechos de efluentes (líquidos o gases), procedentes de las instalaciones nucleares. La cantidad de radiactividad que así se libera debe ajustarse a los niveles admisibles de exposición para grupos de población y está determinada por reglamentos y guías nacionales, basados generalmente en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones.

Hay pocos casos en que los efluentes radiactivos de las instalaciones nucleares puedan descargarse sin algún tipo de control o tratamiento previo para eliminar la radiactividad excesiva. La mayor parte de los desechos radiactivos procedentes del funcionamiento de instalaciones del ciclo del combustible nuclear requieren tratamiento encaminado a concentrar los elementos radiactivos en un volumen menor que permita más fácil manipulación y, por consiguiente, la descarga o evacuación del grueso del material tratado.

La gestión de desechos radiactivos comporta la realización de operaciones y la aplicación de técnicas industriales normales adaptadas para salvar las dificultades que crean las barreras y defensas necesarias para proteger a los operarios contra la irradiación excesiva e impedir el contacto con los radionucleidos. Como resultado, con mucha frecuencia el equipo y los métodos de utilización del mismo son muy complicados, con el fin de permitir su funcionamiento y conservación tras las barreras protectoras. Realmente la mayor parte de las actividades de investigación y desarrollo en la esfera de la tecnología para la gestión de

El Sr. Lennemann es Jefe de la Sección de Tratamiento y Evacuación de Desechos, División de Seguridad Nuclear y Protección del Medio Ambiente.

desechos radiactivos tienen por objeto adaptar las operaciones industriales y las técnicas de laboratorio normales a la manipulación de materiales radiactivos.

Todos los que desempeñan funciones relacionadas con la gestión de desechos radiactivos, o se hallan bien informados acerca de esa materia, coinciden en que la tecnología y los esquemas operacionales se han desarrollado hasta el punto de resultar hoy viables. Así, se dispone de los conocimientos básicos necesarios para recoger, tratar, embalar y almacenar en condiciones de seguridad todos los desechos importantes del ciclo del combustible nuclear. Además, en muchos casos existen diferentes tecnologías para diversas situaciones o para conseguir resultados económicos óptimos.

Por lo tanto, desde un punto de vista técnico, no es la falta de métodos y tecnologías apropiados para la manipulación de desechos radiactivos el obstáculo para la eficaz explotación de la energía nucleoelectrónica. Por otro lado, parte de la necesaria tecnología de gestión de desechos radiactivos permanece todavía en su fase de desarrollo. Queda mucho por hacer para perfilar los detalles técnicos y de diseño, para cumplir los requisitos reglamentarios adecuados, y para adaptar la tecnología a las condiciones y controles de funcionamiento real. Estas observaciones se aplican principalmente a aquellos desechos radiactivos procedentes de la reelaboración de combustible irradiado que contiene esencialmente todos los productos radiactivos de la fisión nuclear.

## RESIDUOS DE TRATAMIENTO DEL URANIO

Los residuos de tratamiento del uranio no representan riesgos radiactivos graves cuando se trabajan en locales bien ventilados. El principal problema es la posibilidad de formación de concentraciones peligrosas de gas radón procedentes de la desintegración de cantidades relativamente pequeñas de radio-226 presentes en los residuos.

Las zonas de evacuación de los residuos pueden situarse, tratarse y aislarse adecuadamente. Existe una tecnología para estabilizar estos residuos consistente en cubrirlos con tierra y vegetación y, si es necesario, protegerlos por otros medios, de modo que se evite su dispersión por el viento, el agua o por cualquier actividad humana. Además, dichas zonas de residuos pueden y deben registrarse ante las autoridades catastrales locales y estatales, imponiéndose a perpetuidad restricciones a su futuro uso o aprovechamiento.

## EFLUENTES PROCEDENTES DEL REFINO Y ENRIQUECIMIENTO DEL URANIO

En las operaciones de refinado y enriquecimiento, los productos químicos tóxicos no radiactivos que se encuentran en los efluentes líquidos y gaseosos suponen un problema más grave que los contaminantes radiactivos. Existen técnicas y métodos industriales de probada eficacia para evitar la contaminación ambiental causada por los disolventes orgánicos, los nitratos, los sulfatos, el amoníaco, los cloruros, los fluoruros, el flúor y otros productos químicos empleados en los procesos de refinado y enriquecimiento. El uranio agotado procedente de las plantas de enriquecimiento no se considera normalmente un desecho y se recupera y almacena.

No obstante, el equipo inicial de las refinerías de uranio y el que se utiliza en los tratamientos para convertir el uranio refinado en hexafluoruro de uranio puede con el tiempo llegar a ser radiactivo debido a una acumulación de las trazas de elementos radiactivos existentes todavía en los concentrados de uranio y en el uranio refinado. Estos radionucleidos quedan adsorbidos o forman una lámina en las superficies del equipo y se concentran especialmente en las "cenizas" restantes del proceso de producción del hexafluoruro de uranio. Dicho equipo y otros materiales radiactivos se evacúan enterrándolos bajo control adecuado. También se ha utilizado el vertimiento en el océano.

## FABRICACION DE COMBUSTIBLE DE URANIO

El principal problema en la gestión de desechos procedentes de la fabricación de combustibles a base de uranio lo plantean los elementos y los productos químicos no radiactivos que se utilizan en su elaboración. El uranio de los desechos se recupera, siendo mínimas las concentraciones de uranio en los efluentes de las plantas de fabricación de combustibles a base de uranio. Normalmente, en la fabricación de tales combustibles se utilizan técnicas de gestión de desechos y métodos de seguridad procedentes de la industria convencional, que generalmente resultan suficientes. El equipo contaminado por el uranio puede descontaminarse fácilmente para ser evacuado en condiciones de seguridad o para su posterior reutilización.

## DESECHOS EN EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

La radiactividad inducida por captura neutrónica es la mayor fuente de desechos radiactivos que necesitan tratamiento en el emplazamiento mismo de la central nuclear. Esta captura neutrónica tiene lugar en los productos de corrosión y en otras impurezas presentes en el refrigerante que circula a través del núcleo del reactor, así como en los componentes estructurales del reactor que están expuestos a elevados niveles de irradiación. Además, se encuentran pequeñas cantidades de productos radiactivos de fisión en el refrigerante del reactor y en la piscina de almacenamiento del combustible como resultado de un fallo ocasional de las vainas del combustible.

Los contaminantes radiactivos que crean mayores problemas son los productos de fisión resultantes de la fisión nuclear en los elementos de combustible. Estos productos de fisión se liberan en la planta de reelaboración del combustible, donde las vainas del combustible se rompen por ataque químico o por acciones mecánicas y se disuelve el combustible en solución acuosa. Los productos solubles de fisión se disuelven en solución acuosa junto con el plutonio y el uranio no quemado. Los productos de fisión gaseosos se descargan también al conjunto de gases de escape de la planta durante las operaciones de rotura y disolución.

Los radionucleidos que quedan en la disolución después de la recuperación del uranio y del plutonio son los productos de fisión y los actínidos, también llamados elementos transuránicos, entre los que se encuentran el plutonio no recuperado y los elementos más pesados (Np, Am, Cm, etc.) de la serie de los actínidos formados por captura neutrónica. Puesto que estos elementos transuránicos se desintegran con emisión de partículas alfa, se usa normalmente el término colectivo de "emisores alfa". Los desechos contaminados con emisores alfa se llaman "desechos contaminados alfa" o "desechos emisores alfa".

Los productos de fisión y los emisores alfa contaminan todos los materiales con los que entran en contacto, y esta contaminación se propaga mediante los contactos en cadena. Por eso resultan radiactivos desechos que de otro modo serían desechos industriales normales. Las operaciones de descontaminar dichos materiales para ciertos fines conduce a la producción de otros desechos radiactivos como consecuencia del tratamiento de descontaminación. La manipulación y la fabricación de materiales en las que participan productos de fisión en forma líquida y sólida así como transuránicos, especialmente en el caso del plutonio en la fabricación de combustibles de plutonio y de óxido de uranio y plutonio, produce la contaminación del equipo y de los sistemas de ventilación, contaminación que es necesario contrarrestar.

## DESECHOS GASEOSOS

Los efluentes gaseosos procedentes de la operación del reactor pueden contener radioisótopos de los gases nobles (principalmente argón-41, criptón-85 y xenón-133), los radioyodos-129 y -131, el tritio y el óxido de carbono-14. No obstante, como ya se ha mencionado,

las principales descargas de radionucleidos en estado gaseoso tiene lugar cuando el combustible nuclear agotado se rompe y disuelve en la planta de reelaboración del combustible. Allí las descargas más importantes son de criptón-85, xenón-133, los radioyodos-129 y -131 y el tritio. El xenón-133, con su período de desintegración relativamente corto (5,3 días), se estima que no debiera llegar a plantear problemas, disponiéndose de métodos de retardo y desintegración, si es necesario, antes de su descarga. Los radioyodos pueden eliminarse de las corrientes de desechos gaseosos por depuración a contra-corriente del gas con disoluciones acuosas de sosa cáustica, nitrato de mercurio, ácido nítrico o por adsorción química en zeolitas tratadas con plata o en otros metales con una determinada afinidad por el yodo. Otro método es por adsorción en carbón vegetal, que puede estar también impregnado con productos químicos que absorberán los compuestos de yodo.

Aunque no se ha establecido definitivamente hasta qué punto el tritio, el cripton-85 y el carbono-14 pueden descargarse a la atmósfera sin plantear un problema de orden general, los análisis han indicado que tal riesgo no se presentará hasta finales de siglo. No obstante, se están investigando posibles métodos criogénicos (baja temperatura) de separación para eliminar, si es necesario, el cripton-85 y el xenón-133. También se están desarrollando otras técnicas de separación, tales como la absorción en hidrocarburos fluorados líquidos, la adsorción en carbón vegetal u otros sólidos, y la difusión a través de membranas.

Hasta ahora no se ha encontrado ningún procedimiento práctico para separar el tritio de los efluentes de desecho dado que buena parte del tritio que se libera está sumamente diluido en forma de agua tritiada. Un método satisfactorio para separar el tritio en la reelaboración del combustible es confinar, oxidar y recoger los efluentes gaseosos procedentes del corte y de otras operaciones iniciales en la planta de reelaboración, convirtiendo el tritio ( $T_2$ ) en  $T_2O$ , y recuperar el  $T_2O$  (probablemente THO) con concentraciones de tritio del 1 al 5%. Otros métodos objeto de investigación son la adsorción del tritio en óxido de vanadio y otros tratamientos de separación isotópica tales como la difusión a temperatura y presión elevadas a través de películas de paladio y el empleo de tamices moleculares. También se están examinando las técnicas de extracción por disolución selectiva.

El carbono-14 puede separarse de los efluentes gaseosos en forma de óxido por depuración con sosa cáustica o adsorción en medios alcalinos sólidos, si ello resulta necesario. Las materias radiactivas en forma de partículas y los aerosoles presentes en los efluentes gaseosos pueden separarse por técnicas de filtración de elevada eficacia.

## DESECHOS LIQUIDOS

Basándose principalmente en sus niveles de radiactividad, los desechos líquidos radiactivos se clasifican, de manera general como de actividad alta, media y baja. Se han considerado generalmente de alta actividad el refinado (efluente líquido) procedente de las operaciones del primer ciclo de reelaboración del combustible. Dicho líquido contiene más del 99,9% de los productos de fisión no gaseosos, el plutonio no recuperado y los actínidos superiores (transuránicos). La distinción entre desechos de actividad media y baja es más bien arbitraria y depende generalmente, además de su contenido de radionucleidos, de que deban ser aislados y/o tratados o descargados en el medio. Aunque el contenido en elementos transuránicos y productos de fisión en los desechos líquidos de actividad media y baja varía considerablemente, existe no obstante una diferencia clara entre los procedimientos para su tratamiento y los aplicados a los desechos de alta actividad. Por lo tanto pueden ser considerados basándose en tal distinción.

Como se ha dicho, los desechos líquidos de alta actividad son esencialmente los líquidos refinados procedentes del primer ciclo de reelaboración del combustible. Los desechos de gran actividad pueden comprender también concentrados de productos de fisión y

elementos transuránicos procedentes del tratamiento de los desechos líquidos de actividad media y baja.

Los desechos líquidos de alta actividad se almacenan en depósitos refrigerados de acero inoxidable de diseño adecuado, situados generalmente en bóvedas recubiertas de acero. Este método se considera seguro para largos períodos, aunque requiere estrecha vigilancia. No obstante, es opinión general que estos desechos deben solidificarse para conseguir su aislamiento a largo plazo respecto de la biosfera terrestre.

Se han desarrollado varios métodos para la solidificación de desechos de alta actividad, entre ellos la utilización de lechos fluidificados, lechos agitados, hornos rotatorios, rociado y crisoles. Todos los métodos consisten esencialmente en calentar los desechos hasta una temperatura comprendida entre  $400^{\circ}$  y  $1\ 200^{\circ}$  C, lo que elimina todos los componentes volátiles, dejando un sólido calcinado. No obstante, la mayoría de los desechos calcinados son relativamente solubles y generalmente no se consideran a productos adecuados para la evacuación. Por lo tanto, en la mayoría de los casos se incluyen en la etapa de calcinación componentes a base de borosilicato o de fosfato que proporcionan vitrificación o se añaden en una segunda etapa del proceso de solidificación incorporando el calcinado en vidrio fundido, que, al enfriarse, da un producto vitrificado con tasas de lixiviación similares a los del vidrio Pyrex. Hay, como mínimo, 15 métodos para producir esencialmente el mismo producto vitrificado. No obstante, con excepción del procedimiento francés AVM, que se proyecta comience a utilizarse plenamente a escala industrial en Marcoule en 1977, todos los demás procedimientos no han sido ensayados y se encuentran en fase de investigación. Un nuevo método objeto de investigación en Eurochemic consiste en incorporar los calcinados o productos vitrificados radiactivos en matrices metálicas.

Los desechos líquidos de actividad intermedia se caracterizan por tener volúmenes menores y concentraciones superiores de radionucleidos en comparación con los desechos líquidos de baja actividad. No obstante, como se ha indicado ya, no existe una distinción universalmente aceptada entre ambos. Los desechos líquidos de actividad intermedia pueden proceder de derrames, de disoluciones de limpieza de los gases de escape, de productos regenerados por intercambio iónico, de disoluciones de descontaminación de los cofres y de la central, del vertido de disolventes de la central, de disoluciones químicas de desvenado, de líquidos refinados procedentes de los ciclos de purificación del uranio y del plutonio, y algunos son desechos de laboratorio. Ejemplo de desechos líquidos de baja actividad son los productos condensados del evaporador y del concentrador, los desechos de lavandería, productos condensados procedentes de los sistemas de ventilación de la vasija y el posible escape de radionucleidos en el agua de refrigeración o en el vapor del proceso.

Todos los productos radiactivos solubles en agua liberados durante el funcionamiento del reactor se introducen originalmente en el refrigerante primario o en la piscina de almacenamiento del combustible, procedente en general de deterioros en las vainas. También existen productos de corrosión radiactivos en forma de partículas. Esta radiactividad se extiende a otras partes del sistema del reactor por fugas o por tratamiento de estas corrientes; por ejemplo, los productos regenerados por intercambio iónico y los lodos del evaporador. Las corrientes de desechos líquidos de actividad intermedia y baja originados en la reelaboración del combustible se han enumerado ya en el párrafo anterior. Además de los desechos de descontaminación purificación y lavado, una planta de fabricación de combustibles a base de mezcla de óxidos ( $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ ) produce también generalmente corrientes de desechos líquidos procedentes del tratamiento del material residual para la recuperación del plutonio. Estas corrientes pueden considerarse como material de actividad intermedia o baja según sus características de contenido en actínidos.

Las técnicas básicas de tratamiento de que se dispone para reducir los niveles de radiactividad de las corrientes de desechos líquidos son la filtración y la centrifugación (para eliminar materiales radiactivos particulados), la evaporación, el intercambio iónico, la floculación y la precipitación. También pueden utilizarse piscinas para las infiltraciones de los desechos líquidos que contienen concentraciones muy bajas de los productos de fisión de período de desintegración más corto. Las técnicas de concentración mediante membranas son actualmente objeto de experimentación, pero no se ha generalizado su uso. Los productos de las precedentes técnicas básicas de tratamiento son concentrados líquidos y lodos que deben pasar al estado sólido para su almacenamiento o evacuación. Se dispone de técnicas de incineración y destilación a vapor para el tratamiento de disolventes y aceites orgánicos radiactivos. También es posible reducirlos al estado sólido mediante la utilización de ciertos materiales sólidos absorbentes de aceites.

## DESECHOS SOLIDOS

Además del equipo de los materiales sólidos contaminados por la radiactividad inducida o de contacto, entre los desechos sólidos radiactivos se encuentran también los desechos líquidos solidificados, de alta actividad, los concentrados de desechos líquidos "acondicionados" de actividad intermedia y baja, las resinas intercambiadoras de iones cargadas o agotadas, y los radionucleidos gaseosos incorporados a algunos medios sólidos para su almacenamiento o evacuación. Los desechos sólidos se clasifican en dos categorías: combustibles e incombustibles. Según la instalación de que se trate, los desechos combustibles e incombustibles pueden hallarse mezclados, o puede ser necesaria una separación antes del tratamiento y/o embalaje para su almacenamiento o evacuación.

Los desechos radiactivos sólidos combustibles comprenden una amplia variedad de materiales tales como papel, pizarras, algodón absorbente, láminas de plástico, guantes de protección, zapatos de caucho, maderas, cartones, resinas orgánicas intercambiadoras de iones, equipo auxiliar de filtros, medios filtrantes combustibles de elevada eficacia, etc. Puesto que muchos de estos materiales de desecho se recogen como basura general, normalmente se debe clasificarlos antes de su incineración. Las operaciones con cajas de guantes para la fabricación y purificación del plutonio producen materiales radiactivos de caucho o plástico.

Las técnicas de incineración en seco tradicionales, aunque se realizan con éxito, siguen todavía creando problemas en cuanto a la combustión total y a la limpieza de los gases de escape. Otras técnicas de incineración hoy en desarrollo utilizan crisoles con agitador, hornos de turbulencia y lechos fluidificados. Las técnicas de oxidación por vía húmeda que incluyen la digestión en medio ácido, actualmente en desarrollo, y los procedimientos pirolíticos parecen ofrecer resultados satisfactorios. También se está examinando la incorporación e incineración de desechos del combustible en mezclas de sal fundida.

Aunque el equipo deteriorado puede presentar los más difíciles problemas debido a su gran tamaño y alto nivel de irradiación, también hay que atender a la constante corriente de desechos radiactivos varios no combustibles procedentes de cada tipo de instalación del ciclo del combustible nuclear. Si bien el componente principal de los desechos sólidos incombustibles es el metal, incluyendo las vainas del combustible, también son de importancia otros materiales como el vidrio y el hormigón. Los materiales combustibles tales como las resinas orgánicas intercambiadoras de iones, los plásticos, la grasa y residuos procedentes de la limpieza de los suelos se incluyen a menudo con los desechos incombustibles.

Elementos de gran tamaño característicos del equipo en una planta de reelaboración del combustible pueden ser los disolvedores, las columnas de extracción de disolventes y los aparatos de concentración, que pueden tener hasta 3 metros de diámetro y 10 metros de

altura. Entre los desechos incombustibles de los reactores pueden encontrarse grandes componentes del núcleo del reactor. A veces, muchos de los grandes aparatos deben desmontarse antes de separarlos del sistema. El método normal es limpiar con descargas líquidas y descontaminar dicho equipo en la medida de lo posible. Tanto el equipo de la planta de reelaboración del combustible como el del reactor pueden ser altamente radiactivos, requiriendo manipulación remota y un blindaje del personal equivalente a varios centímetros de hormigón. Dicho equipo puede almacenarse hasta que disminuya la radiactividad por desintegración.

El equipo averiado procedente de las operaciones de tratamiento del plutonio y de fabricación de combustible a base de mezcla de óxidos, tal como las cajas de guantes, puede ser escasamente radiactivo y permitir ser montado sin blindaje o con un blindaje ligero para los operarios. No obstante, la presencia de plutonio requiere esmeradas precauciones para evitar que contamine el medio circundante.

En general, los desechos incombustibles se embalan con un blindaje adecuado de protección, después de haberse machacado o fundido, si es posible, para reducir su volumen. Los desechos incombustibles de menor volumen, tales como las cenizas de incineración, las resinas intercambiadoras de iones y los lodos y residuos del tratamiento de desechos líquidos de actividad intermedia y baja, se incorporan a masas de hormigón y asfalto. También se utilizan resinas de urea-formaldehído, matrices de sal y otros absorbentes y materiales de embalaje.

## ALMACENAMIENTO

El almacenamiento entraña facilidad de recuperación. Las instalaciones de almacenamiento de desechos radiactivos deben impedir, por medio de un confinamiento físico, que las radiaciones afecten a la población. Es necesario establecer una vigilancia continua para garantizar que se cumplen esas dos condiciones.

Como se ha indicado anteriormente, no ha sido necesario ni parece que lo sea en un futuro próximo almacenar materiales radiactivos en estado gaseoso. No obstante, pueden comprimirse y almacenarse en cilindros metálicos. Se están perfeccionando técnicas para incorporarlos a matrices sólidas y absorbentes como protección contra su repentina descarga en caso de rotura de un depósito. Los desechos radiactivos líquidos pueden almacenarse adecuadamente en recipientes de uno u otro tipo. Los métodos de almacenamiento para desechos sólidos radiactivos varían desde el empleo de celdas de hormigón o de tierra para materiales de radiactividad elevada hasta simples estructuras refractarias contra las radiaciones de baja intensidad. También se utilizan minas y túneles subterráneos en formaciones geológicas secas. La experiencia adquirida en el almacenamiento de elementos de combustibles irradiados en piscinas o celdas refrigeradas por aire puede aplicarse al almacenamiento de desechos sólidos de alta actividad.

## EVACUACION

La evacuación supone un lugar definitivo de depósito del que el material no se va a retirar ya nunca. Además, una vez garantizada la seguridad e impenetrabilidad del método de evacuación, la vigilancia del emplazamiento puede reducirse a un mínimo e incluso no ser continua. Se acepta generalmente que para una evacuación satisfactoria es mejor que todos los desechos radiactivos tengan forma sólida relativamente insoluble, que es menos susceptible de dispersión desde el lugar de evacuación que las formas líquidas o gaseosas. También puede utilizarse el método de embalaje para crear una barrera entre el contenido y el entorno. Por otro lado, en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas se han experimentado los métodos de inyección en condiciones de seguridad para desechos líquidos de actividad

intermedia y baja en formaciones porosas de estructuras geológicas profundas. En los Estados Unidos de América, el Oak Ridge National Laboratory está experimentando procesos de inyección de una mezcla de desechos líquidos y de agentes solidificantes en grietas de esquistos mediante hidrofractura.

A pesar de la prometedora utilización del espacio interplanetario, la evacuación de desechos radiactivos sólidos seguirá siendo terrestre durante mucho tiempo. Hoy se utilizan procedimientos de enterramiento y de vertimiento en el mar para la evacuación de desechos sólidos de actividad intermedia y baja. La técnica de enterramiento varía desde la utilización de trincheras y celdas de hormigón, que pueden rellenarse posteriormente con hormigón adicional, hasta el enterramiento directo del desecho embalado en trincheras, pozos o terraplenes. En este caso tiene particular importancia la protección contra la migración de radionucleidos a las aguas subterráneas. El vertimiento en el mar requiere embalaje y preparación adecuados de los desechos para resistir la presión del agua contra el recipiente, que debe tener peso suficiente para hundirse en las profundidades del océano y permanecer en ellas. La cantidad de radionucleidos evacuados en cualquier lugar (en tierra o en el mar) debe controlarse cuidadosamente para no exceder la capacidad del lugar de que se trate. Todavía está en estudio la cantidad de desechos sólidos contaminados con emisores alfa de período largo de desintegración (desechos emisores alfa) que puede evacuarse en cada lugar por enterramiento o vertimiento marino, para lo que se debe tener en cuenta tanto la concentración en los desechos así como la cantidad total.

En la República Federal de Alemania se está experimentando sobre la evacuación en una formación salina subterránea de desechos sólidos (convenientemente embalados) con actividades intermedias y bajas. En otros muchos países se encuentran en estudio métodos similares.

El producto de activación de más importancia presente en los desechos sólidos es el cobalto-60, con un período de desintegración de 5,3 años. Por lo tanto, dentro de 150 a 200 años los componentes de reactores intensamente irradiados habrán alcanzado por desintegración espontánea niveles inofensivos. Para un tal período de tiempo relativamente corto parece ser adecuado el enterramiento o vertimiento en el mar de desechos adecuadamente embalados.

Por otro lado, los desechos contaminados con productos de fisión de período de desintegración más largo pueden necesitar de 600 a 1000 años antes de que dejen de significar un riesgo radiológico. Los desechos contaminados con plutonio-239 (período de desintegración de 24 300 años) pueden necesitar períodos de confinamiento de hasta 500 000 años. Otros actínidos transuránicos pueden necesitar más o menos períodos de tiempo de escala geológica antes de que sus concentraciones desciendan a niveles admisibles.

Normalmente no existe un método seguro para la evacuación de los desechos solidificados de alta actividad y de otros desechos notablemente contaminados con emisores alfa; ello se debe posiblemente a que hasta ahora no ha habido necesidad de tal tipo de evacuación. Por otro lado, no pueden ignorarse por más tiempo las inquietudes de la opinión pública y los problemas políticos que suscitan estas cuestiones. Muchos países están examinando actualmente las posibilidades de evacuación en estructuras geológicas subterráneas (evacuación geológica) de los desechos solidificados de gran actividad y de emisores alfa, lo que parece el único método utilizable con la tecnología actual. Se están estudiando para ello posibles formaciones de rocas salinas, arcillosas y cristalinas. Puede esperarse que dentro de los próximos cinco o siete años, estarán ya en ejecución diferentes proyectos experimentales de evacuación geológica. Se ha propuesto tal tipo de evacuación en los sedimentos en el fondo del mar o en zonas geológicamente estables de



los fondos marinos, utilizando para ello las tecnologías recientemente desarrolladas para la exploración y explotación de yacimientos petrolíferos submarinos. No obstante, pasará algún tiempo (diez o más años) antes de que tales técnicas hayan superado la fase exploratoria, dejando aparte la cuestión de que tales procedimientos sean posibles desde un punto de vista económico.

Una idea interesante es separar los actínidos emisores alfa con períodos de desintegración muy largos del grueso de los desechos, especialmente en el caso de desechos de alta actividad. El restante material contaminado del producto de fusión necesitaría permanecer aislado solamente 1 000 años, lapso de tiempo más adecuado. Sin los productos de fisión generadores de altas temperaturas, los actínidos, que generan poco calor, podrían evacuarse de algún modo adecuado o reciclarse de manera que pudiesen quemarse en los reactores nucleares (transmutación) para disminuir su período de desintegración o para convertirse en elementos estables. Técnicamente es posible separar los actínidos en concentraciones despreciables, pero no es seguro que ello sea operacionalmente conseguible. Además, habrán de pasar varias décadas antes de que se demuestre la posibilidad de reciclado de los actínidos.

### OPERACIONES DE GESTION DE DESECHOS RADIATIVOS

Finalmente, no debe pasarse por alto que la mayor parte de los procedimientos de tratamiento de desechos radiactivos generan a su vez desechos líquidos de actividad intermedia o baja, procedentes en su mayor parte del proceso de tratamiento de los gases de escape de los condensados del proceso y de las disoluciones de descontaminación, y producen también, en volúmenes considerables, equipo y basuras contaminados. Dichos desechos o bien se reciclan por medio de los procesos de tratamiento, convirtiéndose finalmente en efluentes que pueden descargarse, o bien que se añaden a otros desechos radiactivos para su almacenamiento o evacuación. En consecuencia, desde el punto de vista de la gestión de desechos, cuanto menos desechos hayan de manipularse, tanto mejor.