

Gestión de desechos radiactivos en centrales nucleares

Reseña de los tipos de desechos de actividad baja e intermedia y de los métodos existentes para su tratamiento

por V.M. Efremkov

En muchos países las centrales nucleares constituyen una parte importante del sistema energético nacional. La energía nucleoelectrica es económicamente competitiva y ambientalmente limpia en comparación con la mayoría de las otras formas de energía utilizadas para la producción de electricidad. Utilizada conjuntamente con ellas, contribuye a asegurar el suministro nacional de electricidad. Parece indudable que a medio y a más largo plazo, continuará siendo necesaria una creciente contribución a los suministros nacionales de energía por parte de la energía nuclear si ha de mantenerse el nivel de vida de los países industrializados y satisfacerse las necesidades energéticas de los países en desarrollo.

Como resultado de la explotación de reactores nucleares se producen algunos desechos radiactivos. No obstante, comparados con la cantidad de desechos que se producen en centrales de producción de energía eléctrica alimentadas con carbón, éstos son de un volumen considerablemente menor. (Véase el cuadro.) Los desechos producidos en centrales nucleares son de actividad bastante baja y los radionucleidos que contienen son de baja radiotoxicidad y en general de período corto. Ahora bien, las centrales nucleares son las más numerosas de las instalaciones nucleares y producen el mayor volumen de desechos radiactivos.

La naturaleza y cantidad de desechos producidos en una central nuclear depende del tipo de reactor, de sus características específicas de diseño, de sus condiciones de funcionamiento y de la integridad del combustible. Estos desechos radiactivos contienen radionucleidos activados de los materiales estructurales, del moderador y del refrigerante; productos de corrosión; y contaminación de productos de fisión procedentes del combustible. Los métodos aplicados para el tratamiento y acondicionamiento de desechos producidos en centrales nucleares han alcanzado actualmente un elevado grado de eficacia y fiabilidad y se están desarrollando aún más para mejorar la seguridad y la economía del sistema completo de gestión de desechos.

Desechos producidos en centrales nucleares

En las centrales nucleares se producen desechos radiactivos de actividad baja e intermedia (LILW) por contaminación de diversos materiales con radionucleidos producidos por fisión y activación en el reactor o liberados de las superficies del combustible o de las vainas. Los radionucleidos se liberan principalmente y se reco-

gen en el sistema de refrigeración del reactor y, en menor cantidad, en la piscina de almacenamiento de combustible gastado.

Los principales desechos que se producen durante la explotación de una central nuclear son componentes que se retiran durante la recarga del combustible o el mantenimiento (principalmente sólidos activados, por ejemplo, acero inoxidable conteniendo cobalto 60 y níquel 63) o desechos operacionales, tales como líquidos, resinas intercambiadoras de iones y filtros radiactivos que están contaminados con productos de fisión procedentes de circuitos que contienen refrigerante líquido.

Para reducir la cantidad de desechos para el almacenamiento provisional y minimizar los costos de evacuación, todos los países aplican o tienen previsto aplicar medidas para reducir el volumen de desechos generados, cuando sea posible. La reducción de volumen es particularmente interesante para desechos de actividad baja que son en general de gran volumen pero de baja radiactividad. Se pueden realizar notables mejoras mediante la adopción de medidas administrativas, por ejemplo, sustitución de las toallas de papel por secadores de aire caliente, introducción de ropa de protección de larga duración reutilizable, etc. y mediante mejoras generales de la actuación operacional o del "buen orden".

Desechos líquidos y desechos sólidos húmedos

Según los diferentes tipos de reactores actualmente en funcionamiento comercial en todo el mundo, se producen diferentes corrientes de desechos. Estas corrientes difieren tanto en contenido de actividad como en cantidad de desechos líquidos generados. Los reactores refrigerados y moderados por agua producen más desechos líquidos que los refrigerados por gas. Los volúmenes de desechos líquidos producidos en reactores de agua en ebullición (BWR) son notablemente superiores a los producidos en reactores de agua a presión (PWR). Debido al hecho de que el sistema de depuración de los reactores de agua pesada (HWR) trabaja principalmente con técnicas de intercambio iónico de paso único para reciclar el agua pesada, no se producen en ellos prácticamente concentrados líquidos.

Se producen desechos líquidos activos en la depuración de los refrigerantes primarios (PWR, BWR), limpieza de la piscina de almacenamiento del combustible gastado, desagües, agua de lavado y fugas de agua. Las operaciones de descontaminación de reactores también producen desechos líquidos resultantes de las

El Sr. Efremkov es funcionario superior de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y de Gestión de Desechos del OIEA.

actividades de mantenimiento de las tuberías y del equipo de la central. Los desechos de descontaminación pueden comprender lodos (productos de corrosión) y una amplia variedad de productos orgánicos, tales como ácidos oxálico y cítrico.

Los sólidos húmedos son otro tipo de desechos producidos en centrales nucleares. Comprenden diversas clases de resinas intercambiadoras de iones agotadas, medios filtrantes y fangos. Las resinas agotadas constituyen la fracción más significativa de los desechos sólidos húmedos producidos en reactores de potencia. Las resinas granuladas se emplean en desmineralizadores profundos y son corrientes en centrales nucleares. Las resinas en polvo raramente se utilizan en PWR pero se utilizan normalmente en BWR con desmineralizadores de filtros de revestimiento previo. En muchos BWR, una fuente importante de desechos de resinas en polvo son los "refinadores de condensados" utilizados para la depuración adicional del agua condensada tras la evaporación de los desechos líquidos.

Los filtros de revestimiento previo utilizados en centrales nucleares para el tratamiento de desechos líquidos producen otro tipo de desecho sólido húmedo, los lodos de filtros. Los adyuvantes de filtración, generalmente tierra de diatomeas o fibras celulósicas, y los lodos de corrosión que se eliminan de los desechos líquidos forman juntos los lodos de filtros. Algunos sistemas de filtración no requieren materiales adyuvantes de filtración. Por lo tanto, los lodos procedentes de dichas unidades no contienen otros materiales.

Tratamiento y acondicionamiento de desechos líquidos/sólidos

Los desechos radiactivos líquidos producidos en centrales nucleares contienen en general componentes radiactivos solubles e insolubles (productos de fisión y de corrosión) y sustancias no radiactivas. El objetivo general de los métodos de tratamiento de desechos es descontaminar los desechos líquidos hasta tal grado que el volumen total descontaminado de desechos acuosos pueda liberarse al medio ambiente o reciclarse. Los concentrados de desechos se someten posteriormente

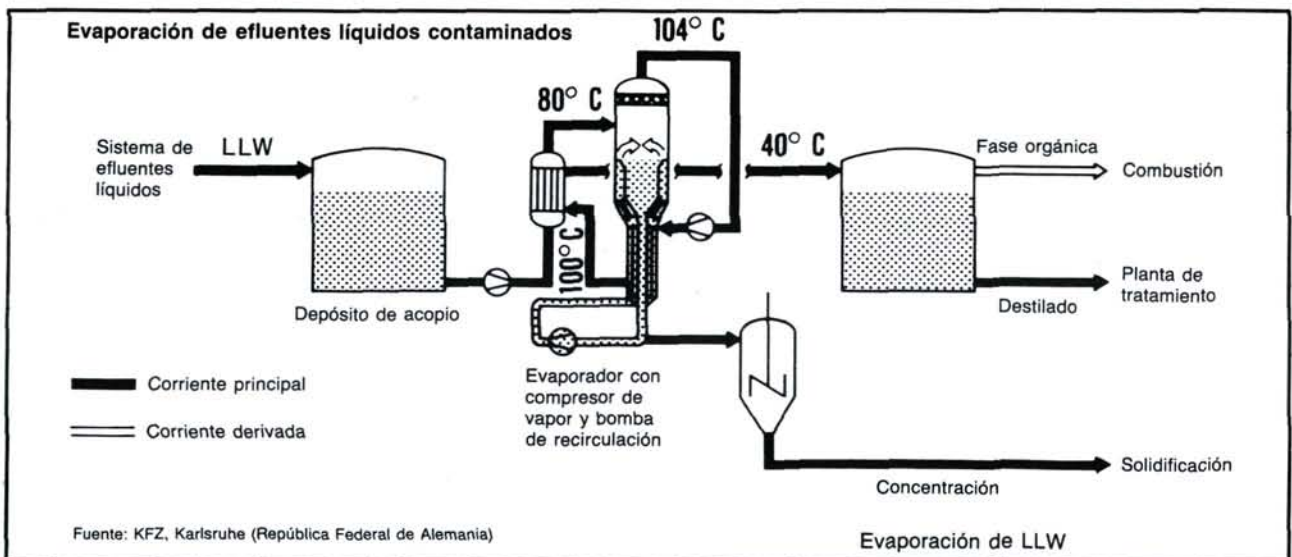
a acondicionamiento, almacenamiento y evacuación. Dado que las centrales nucleares producen casi todas las categorías de desechos líquidos, se aplican prácticamente todos los procesos para tratar efluentes radiactivos. Se utilizan normalmente técnicas estándar para descontaminar corrientes de desechos líquidos. Cada proceso tiene un efecto particular sobre el contenido radiactivo del líquido. El grado en que se utilizan en combinación depende de la cantidad y origen de la contaminación. Se dispone de cuatro procesos técnicos principales para el tratamiento de desechos líquidos: evaporación; precipitación/floculación química; separación en fase sólida; e intercambio de iones.

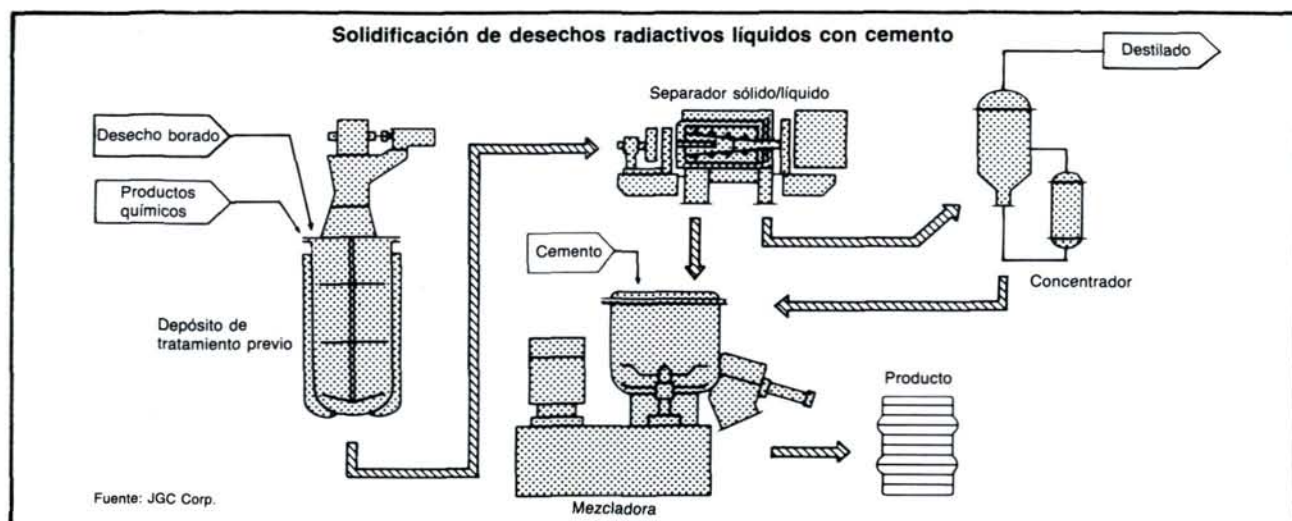
Estas técnicas de tratamiento están bien establecidas y se utilizan ampliamente. No obstante, se encuentran en curso en numerosos países actividades destinadas a mejorar la seguridad y economía basándose en nuevas tecnologías.

El mejor efecto de reducción de volumen, en comparación con otras técnicas, se logra mediante evaporación. Según la composición de los efluentes líquidos y los tipos de evaporadores, se obtienen factores de descontaminación comprendidos entre 10^4 y 10^6 .

La evaporación es un método comprobado para el tratamiento de desechos radiactivos líquidos que proporciona a la vez buena descontaminación y reducción de volumen. El agua se elimina del proceso en fase vapor quedando componentes no volátiles tales como sales que contienen la mayoría de los radionucleidos. La evaporación es probablemente la mejor técnica para desechos con un contenido relativamente elevado en sales y una composición química bastante heterogénea. (Véase la figura adjunta.)

Aunque puede considerarse como una operación relativamente sencilla que se ha aplicado con éxito en la industria química convencional durante muchos años, su aplicación al tratamiento de desechos radiactivos puede dar lugar a algunos problemas tales como corrosión, formación de incrustaciones o espumación. Dichos problemas pueden reducirse adoptando disposiciones adecuadas. Por ejemplo, puede ajustarse el valor del pH para reducir la corrosión; pueden eliminarse las sustancias orgánicas para reducir la espumación o pueden





añadirse agentes antiespumantes; y puede limpiarse el sistema del evaporador mediante ácido nítrico para eliminar las incrustaciones y pasivar ulteriormente los materiales de construcción.

Hasta ahora, la reducción por evaporación del volumen de los efluentes radiactivos de actividad baja ha sido siempre tan eficaz que el condensado depurado podía descargarse al medio ambiente sin ulterior tratamiento.

Los métodos de precipitación química basados en el principio de separación por coagulación-floculación son los más utilizados en centrales nucleares para el tratamiento de efluentes líquidos de actividad baja y elevado contenido en sales y lodos. Su eficacia depende en gran parte de la composición química y radioquímica del desecho líquido. La mayoría de los radionucleidos pueden precipitarse, coprecipitarse y adsorberse por compuestos insolubles, por ejemplo, hidróxidos, carbonatos, fosfatos y ferricianuros y eliminarse de este modo de la solución. Los precipitados arrastran también partículas en suspensión de la solución por arrastre físico. No obstante, la separación nunca es completa por varias razones, y los factores de descontaminación logrados pueden ser relativamente bajos. Por esta razón, se utiliza normalmente el tratamiento químico en combinación con otros métodos más eficaces.

Se procede a la separación en fase sólida para eliminar materiales en suspensión y sólidos depositados de los desechos líquidos. Existen diferentes tipos de equipo de separación disponibles, basados todos en los que se han utilizado normalmente en las plantas convencionales de tratamiento de agua y efluentes en las industrias. Los tipos más frecuentes son filtros, centrifugadoras e hidrociclones. La separación de partículas es una tecnología bien establecida. Casi todas las instalaciones nucleares utilizan dispositivos mecánicos para separar sólidos en suspensión de las corrientes de desechos líquidos. En general, es necesario equipo de separación para eliminar partículas que podrían interferir con los procesos subsiguientes de tratamiento de desechos líquidos, por ejemplo, intercambio de iones, o con la reutilización del agua.

Los filtros característicos pueden eliminar partículas de tamaños submicrométricos, particularmente cuando se utiliza el prerrevestimiento. Una vez agotado, el filtro

se "retrolava" produciendo un lodo del 20 al 40% de sólidos, o en el caso de los tipos cartucho se sustituye la unidad entera.

Los métodos de intercambio de iones se aplican ampliamente en el tratamiento de efluentes líquidos en centrales nucleares. Ejemplos de dichos métodos son la depuración de los circuitos primario y secundario de refrigeración en reactores de agua, el tratamiento del agua de la piscina de almacenamiento del combustible, y la depuración de condensados tras la evaporación.

Los desechos radiactivos líquidos han de satisfacer en general los siguientes criterios para que sean adecuados para el tratamiento por intercambio de iones: la concentración de los sólidos en suspensión en los desechos debe de ser baja; los desechos han de tener un contenido total en sales bajo (generalmente inferior a un gramo por litro); y los radionucleidos deben encontrarse en una forma iónica adecuada. (Para eliminar los coloides pueden utilizarse filtros de revestimiento previo con resina en polvo.)

En la mayor parte de los sistemas técnicos, los procesos de intercambio de iones se aplican utilizando un lecho fijo de material intercambiador de iones colocado en una columna a través de la cual pasa el efluente contaminado de la parte superior a la inferior o viceversa. El material de intercambio iónico puede regenerarse tras haber alcanzado la saturación de los grupos activos (capacidad de saturación). Algunos tipos de intercambiadores de iones se eliminan también como concentrados de desechos para ser solidificados. Por lo tanto, el proceso de intercambio de iones representa un proceso semicontinuo y requiere importantes actividades de mantenimiento, tales como operaciones de lavado por descarga de agua, regeneración, aclarado, y relleno.

Los desechos sólidos húmedos resultantes del tratamiento de desechos líquidos deben transformarse también en productos sólidos para su evacuación final. El proceso de inmovilización supone la conversión de los desechos en formas química y físicamente estables que reduzcan el potencial de migración o dispersión de radionucleidos por procesos que pudieran producirse durante el almacenamiento, el transporte y la evacuación. Si es posible el acondicionamiento de desechos debería producir también una reducción de volumen.

Los métodos más frecuentemente aplicados para el acondicionamiento de sólidos húmedos son la cementación, la bituminización, o la incorporación en polímeros. La inmovilización de desechos radiactivos utilizando cemento se ha practicado ampliamente durante muchos años en numerosos países. (*Véase la figura adjunta.*) El cemento presenta una serie de ventajas, notablemente su bajo costo y la utilización de una planta para el proceso relativamente sencilla. Su densidad relativamente elevada proporciona formas de desechos con un considerable grado de autoblandaje, reduciendo de este modo los requisitos de blindaje adicional de los bultos. En algunos casos, con el fin de lograr un producto de calidad aceptable, pueden utilizarse procesos de tipo químico o físico de tratamiento previo. En algunos casos pueden utilizarse otros materiales adicionales, tales como cenizas de combustibles pulverizadas y escoria de alto horno. Estos se comportan de modo análogo al simple cemento.

La bituminización se ha utilizado también durante una serie de años en diversos países para la solidificación de sólidos húmedos. La bituminización es un proceso en caliente que permite el secado de la corriente húmeda antes de inmovilizarla y embalarla. Esto reduce notablemente el volumen de desechos acondicionados que requieren evacuación, con la consiguiente disminución de costos. No obstante, el betún es potencialmente inflamable y requiere precauciones especiales para evitar su combustión accidental. No obstante, la bituminización ha conseguido creciente aceptación por parte de los productores de desechos y se utiliza para el acondicionamiento de desechos radiactivos en centrales nucleares en los Estados Unidos, Japón, Suecia, la URSS, Suiza y otros países.

La incorporación de sólidos húmedos en plásticos o polímeros es un proceso de inmovilización relativamente nuevo si se compara con la utilización del cemento o del betún. La utilización de polímeros tales como resinas de poliéster, viniléster o epoxídicas se limita generalmente a aquellas aplicaciones en las que el cemento o el betún son técnicamente inadecuados. Dichos polímeros son considerablemente más caros y se necesitan instalaciones de tratamiento relativamente complicadas. Los polímeros tienen la ventaja de que presentan mayor resistencia a la fuga de radionucleidos y que son en general químicamente inertes.

Recientemente, ha aumentado el interés por la utilización de unidades móviles para acondicionar desechos radiactivos de centrales nucleares. Este hecho se debe principalmente a que el método proporciona economías de inversión cuando la producción de desechos en el emplazamiento es pequeña. Las unidades móviles de inmovilización de desechos radiactivos de centrales nucleares para su acondicionamiento se utilizan, por ejemplo, en los Estados Unidos, República Federal de Alemania y Francia. La mayoría de ellas utilizan el proceso de cementación, aunque se han desarrollado varios diseños para utilizar polímeros.

Desechos gaseosos y aerosoles radiactivos

En la explotación normal de centrales nucleares, se producen algunos desechos radiactivos en suspensión en el aire en forma de partículas o de aerosoles gaseosos.

Los aerosoles de partículas radiactivas pueden producirse con una amplia gama de tamaños de partículas, en forma líquida o sólida, posiblemente en combinación con aerosoles no radiactivos. Se producen tres fuentes principales de aerosoles, por emisión de productos de corrosión activados y productos de fisión; desintegración radiactiva de gases a elementos no volátiles; y adsorción de radionucleidos volátiles formados en el proceso de fisión en material en suspensión existente.

Los radionucleidos volátiles más importantes, que forman desechos radiactivos gaseosos producidos durante la explotación normal de centrales nucleares son los halógenos, los gases nobles, el tritio y el carbono 14. La composición y la cantidad de radiactividad existente en las diversas corrientes de desechos en suspensión en el aire dependen en gran parte del tipo de reactor y de la vía de liberación.

Todos los efluentes gaseosos de las centrales nucleares se tratan antes de su descarga a la atmósfera para eliminar la mayor parte de los componentes radiactivos del efluente.

Tratamiento de efluentes gaseosos

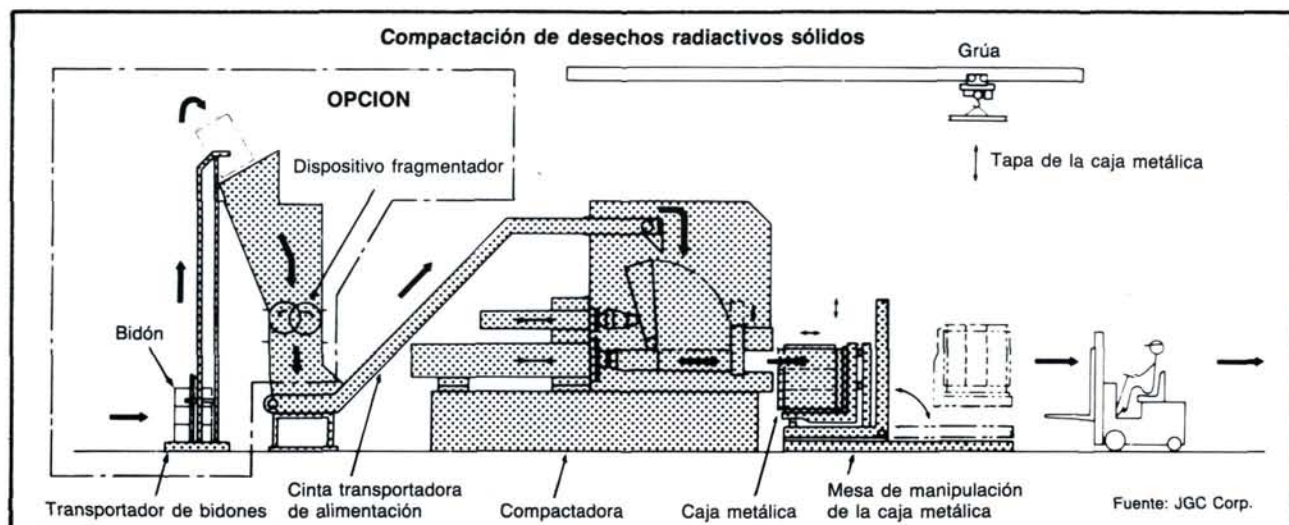
Es práctica común en todas las centrales nucleares que los gases contaminados y el aire de ventilación de los edificios pasen primeramente a través de filtros para eliminar la actividad en forma de partículas antes de descargarlos a la atmósfera por chimeneas. Los sistemas de ventilación y depuración del aire utilizan generalmente prefiltros gruesos y después filtros de elevada eficacia para partículas en suspensión en el aire (HEPA). Estos tienen eficacias de eliminación de partículas características del 99,9% o superiores para partículas de 0,3 mm.

El yodo radiactivo producido durante la explotación de las centrales nucleares se elimina normalmente mediante filtros de carbón activado impregnados utilizados en combinación con filtros para partículas. Se requiere la impregnación para retener los compuestos orgánicos de yodo de los gases efluentes.

Dado que los gases nobles radiactivos liberados de los elementos combustibles en pequeña cantidad son principalmente de período corto, demorando su liberación se permite que el proceso de desintegración radiactiva reduzca en gran parte las cantidades finalmente liberadas al medio ambiente. Se utilizan dos técnicas de retención con este fin: almacenamiento en depósitos especiales o paso a través de lechos de carbón activado de retención.

Para el almacenamiento con fines de desintegración, los gases nobles y su gas portador se bombean primeramente en depósitos de gas que se cierran herméticamente. Tras un tiempo de almacenamiento de entre 30 y 60 días, el contenido de los depósitos se impulsa a la atmósfera a través del sistema de ventilación. Si no se permite la liberación, se amplía el período de almacenamiento cuanto sea necesario.

Los lechos de retardo consisten en una serie de vasijas llenas con carbón activado, que retrasan relativamente el paso de los gases nobles en relación con el gas portador y permiten que se produzca la desintegración radiactiva.



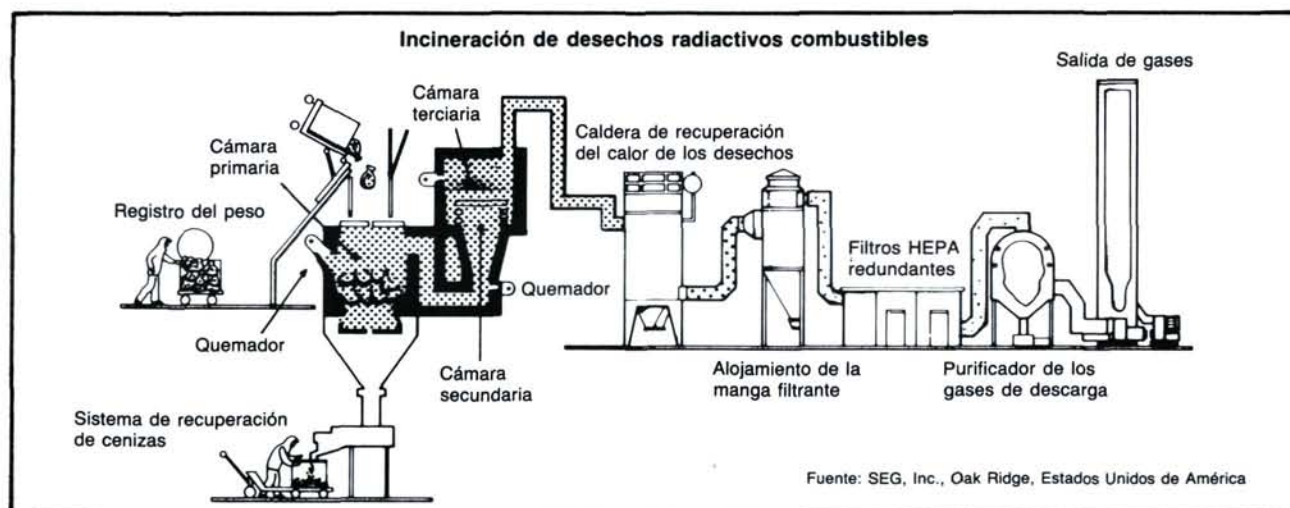
Tratamiento y acondicionamiento de desechos sólidos

Durante la explotación de una central nuclear, se producen varios tipos de desechos sólidos secos que contienen materiales radiactivos. La naturaleza de estos desechos varía considerablemente según la instalación y pueden incluir elementos redundantes de la instalación del reactor, filtros del sistema de ventilación, pavimentos de pisos, herramientas contaminadas, etc. Otra fuente de desechos sólidos es la acumulación de diversos objetos de papel, plástico, caucho, bayetas, ropa, pequeños objetos metálicos o de vidrio, utilizados durante la explotación y el mantenimiento de la central nuclear. Según la naturaleza física y los métodos ulteriores de tratamiento los desechos sólidos secos se clasifican generalmente y se separan en cuatro tipos principales: combustibles, no combustibles, compactables, y no compactables. Ahora bien, cada instalación tiene en general su nivel de clasificación según las condiciones existentes.

Uno de los objetivos esenciales del tratamiento de desechos sólidos es reducir al máximo posible los volúmenes de desechos que han de almacenarse o evacuarse, y concentrar e inmovilizar al máximo posible la radiactividad contenida en los desechos.

Dado que los desechos radiactivos en las centrales nucleares constan de una amplia gama de materiales y formas, ninguna técnica única puede tratar adecuadamente estos desechos; se utiliza generalmente una combinación de técnicas de tratamiento. La técnica básica y más comúnmente utilizada para el tratamiento de las partes más voluminosas de los desechos sólidos se ha basado en la compactación. Este método reduce en una cantidad razonable las necesidades de almacenamiento y evacuación en cuanto a volumen, pero consigue poco en lo que respecta al mejoramiento de las propiedades de los desechos desde el punto de vista de la gestión a más largo plazo.

La experiencia ha demostrado que entre el 50% y el 80% de los desechos radiactivos sólidos producidos en centrales nucleares pueden clasificarse como desechos combustibles. La incineración de estos desechos representa una mejora sustancial desde una serie de puntos de vista con respecto a la compactación. Puede lograrse una reducción muy elevada de volumen y masa. El producto final es una ceniza homogénea que puede embalsarse sin ulterior acondicionamiento en contenedores para el almacenamiento y la evacuación. Aunque la incineración solamente es adecuada para los desechos combustibles, tiene la ventaja de ser capaz de destruir



líquidos orgánicos, por ejemplo, aceites, grasas o disolventes, que son difíciles de tratar por otro método. (Véanse las figuras adjuntas.)

La incineración de pequeñas cantidades de desechos sólidos se realiza normalmente en unidades relativamente simples. Dichas instalaciones de incineración se han instalado actualmente en las centrales nucleares de los Estados Unidos, Japón, Canadá y otros países. Instalaciones de incineración más avanzadas que pueden incinerar desechos con actividad específica relativamente elevada están instaladas en plantas centralizadas de tratamiento de desechos que pueden aceptar éstos de muchas centrales del país y del extranjero. Dichas instalaciones están en funcionamiento en Suecia, Bélgica, Francia y otros países.

Como tratamiento previo para la compactación o incineración se utilizan el corte, la fragmentación y la trituración para reducir el tamaño físico de los diversos elementos de desecho. El papel, los plásticos, la ropa, el cartón, la madera y los metales pueden fragmentarse en piezas en forma de cinta, mientras que los materiales frágiles tales como los bloques de vidrio o de hormigón pueden triturarse en pequeños fragmentos. Estas técnicas pueden utilizarse también como procesos únicos para la reducción del volumen de desechos sólidos.

Nuevos adelantos

La mayoría de los procesos de tratamiento y acondicionamiento de LILW han alcanzado una escala industrial avanzada. Aunque estos procesos y tecnologías son suficientes para la eficaz gestión de desechos radiactivos en centrales nucleares, son todavía posibles y deseables nuevas mejoras en esta tecnología. El creciente costo de la evacuación de desechos radiactivos proporciona un incentivo para adoptar procedimientos y técnicas encaminados a minimizar las cantidades de desechos y a desarrollar nuevas técnicas para minimizar los volúmenes en la etapa de tratamiento y de acondicionamiento. No es posible resumir en el presente artículo todos los nuevos adelantos y mejoras que se están realizando en este sentido en los Estados Miembros.

Algunos ejemplos de dichos nuevos adelantos son la utilización de solventes inorgánicos específicos para mejorar el tratamiento de desechos líquidos; el empleo de técnicas de membrana para el tratamiento de desechos líquidos; la eliminación del agua y el secado de resinas granulares y lechadas de filtros; la incineración de las resinas de intercambio de iones; la limpieza en seco de la ropa protectora para reducir la cantidad de desagüe de la lavandería; la utilización de contenedores de elevada integridad para lodos de filtros secos embalados; la vitrificación de algunos desechos de actividad intermedia para reducir los volúmenes de desechos a evacuar; y la supercompactación de desechos incombustibles.

Quizás no todos estos nuevos adelantos encuentren amplia aplicación en las tecnologías de gestión de desechos, en particular en centrales nucleares. No obstante, la investigación y el desarrollo reflejan el hecho de que la industria nuclear y las compañías eléctricas adoptan grandes precauciones para la gestión segura y económica de desechos radiactivos en centrales nucleares, y que se prevén mejoras en las tecnologías existentes.



En la instalación de Marcoule, en Francia, recipientes de desechos de actividad alta vitrificados se transfieren a pozos refrigerados por aire para su almacenamiento provisional. (Foto: ANDRA)