

Solidificación de desechos de alta actividad

Por John R. Grover

Desde los primeros tiempos de la energía nuclear, ha sido causa de gran preocupación la gestión de los desechos radiactivos, tanto para el público como para los que trabajan en la industria nuclear, sobre todo por lo que atañe a la emisión de sustancias radiactivas al medio ambiente y a los posibles riesgos de contaminación. El combustible nuclear irradiado es el que contiene la mayor cantidad de radiactividad. Si se superan las actuales dudas acerca de las cuestiones de salvaguardia concernientes a la reelaboración del combustible, y se reelabora el combustible irradiado para aprovechar el material fisionable, la gestión y evacuación de los desechos de alta actividad pasará a ser un cometido de gran importancia conforme la capacidad mundial de generación nuclear crezca en los próximos decenios.

La reelaboración requiere la disolución del combustible nuclear irradiado, por lo general en ácido nítrico, y la extracción mediante disolventes del plutonio y el uranio no quemado. La solución restante, que contiene más del 99,9% de los productos de fisión no volátiles, así como algunos componentes residuales de las vainas, vestigios de plutonio y uranio no separados, y una gran parte de elementos transuránicos, constituye los desechos de alta actividad.

Estos desechos líquidos se suelen concentrar por evaporación y almacenar, en forma de solución acuosa en ácido nítrico, en depósitos de acero inoxidable, de gran resistencia. Los resultados que han dado estos depósitos son buenos, pero proseguir con esta práctica obligaría a prolongar durante siglos la supervisión técnica y la sustitución periódica de los depósitos. Si bien el almacenamiento de los desechos líquidos puede considerarse aceptable para unos decenios, al extenderse la energía nucleoelectrónica se estima en general que, a largo plazo, es preferible sustituir esa forma de almacenamiento por otro sistema basado en la solidificación de los desechos.

Desde hace 20 años se viene estudiando la transformación en sólidos de los desechos de alta actividad. Se han ensayado en la práctica con éxito, en plantas pilotos, procedimientos de calcinación y vitrificación en gran escala, y ahora se están investigando otros procedimientos más avanzados.

Como parte de las actividades del OIEA en el campo de la gestión de desechos, la Secretaría del Organismo ha elaborado un informe que pasa revista a la tecnología existente. El informe ha sido examinado y revisado por un Grupo asesor que se reunió en Karlsruhe (República Federal de Alemania) en 1977, y se ha publicado ahora en la Colección de Informes Técnicos, volumen N^o 176: "Techniques for the Solidification of High-Level Radioactive Wastes".

El presente artículo resume los puntos más destacados de ese informe, describiendo principalmente las características básicas de los numerosos procedimientos que se están elaborando, a fin de ilustrar la gran variedad de posibles soluciones para el problema. El

El Sr. Grover pertenece a la Sección de Gestión de Desechos, División de Seguridad Nuclear y Protección del Medio Ambiente.

artículo concluye pasando revista a la situación actual y perspectivas futuras de la solidificación de desechos, desde el punto de vista más amplio de la gestión de desechos en el ciclo del combustible nuclear. En lo que se refiere a la descripción detallada de los procedimientos, la concepción del equipo, su funcionamiento, mantenimiento, posibilidades de ampliación de dimensiones, flexibilidad y aspectos referentes a la seguridad, el lector debe consultar los capítulos correspondientes del volumen N^o 176 de la Colección de Informes Técnicos.

Características básicas de los procedimientos de solidificación

El objetivo primordial de todos los procedimientos de solidificación es transformar la solución de desechos de alta actividad en un producto que tenga menos movilidad, requiera menos vigilancia y sea más adecuado para su evacuación definitiva. Este producto debe satisfacer ciertos criterios: por ejemplo, debe mantener su integridad en el aspecto mecánico, poseer una buena resistencia a la irradiación, adecuada conductividad térmica y el menor índice posible de lixiviación por las aguas. En el actual estado de los conocimientos, los vidrios y los materiales cerámicos se consideran adecuados para la evacuación definitiva.

Los procedimientos básicos de solidificación se ilustran en la Figura 1. El más simple es la evaporación previa, seguida de desnitrificación (o "calcinación") de la solución de desechos, para formar un producto calcinado que puede presentarse en forma granular o compacta. Los materiales calcinados se consideran solamente como un producto intermedio y no cumplen en la medida suficiente los criterios anteriormente enunciados. De todos modos, los materiales calcinados en forma granular pueden mezclarse con aditivos y fundirse para formar un producto vítreo o cerámico. Otro procedimiento es mezclar los aditivos con la solución de desechos y evaporar, desnitrificar y fundir, para formar un producto vítreo o cerámico en una sola etapa. Otra variante es aplicar un procedimiento de adsorción seguido de un tratamiento a alta temperatura para producir un material cerámico. En los últimos años se han realizado tentativas para mejorar las propiedades de esos productos por ulterior tratamiento, tal como la incorporación del material calcinado o vidrio en una matriz metálica o de partículas revestidas para aumentar la resistencia a la lixiviación por el agua y la conductividad térmica.

En los últimos 20 años, se han elaborado unos 30 procedimientos diferentes que pueden clasificarse en cuatro grupos atendiendo a su estado de desarrollo:

1. Procedimientos que han sido demostrados en la práctica, pero que ya no se utilizan regularmente.
2. Procedimientos que se emplean o que se van a emplear pronto en plantas que se están construyendo para tratar los desechos provenientes de plantas de reelaboración a escala industrial.
3. Procedimientos en fase avanzada de desarrollo.
4. Procedimientos en fase inicial de desarrollo.

Procedimientos del grupo primero

El primer procedimiento para la incorporación de desechos en material vitrificado se utilizó en Chalk River (Canadá), donde la solución de desechos se añadía a una mezcla de nefelina/sienita/cal y se fundía a 1350°C. De este material se tomaron muestras radiactivas que se enterraron en 1960, y desde entonces se viene estudiando la lixiviación de nucleidos por las aguas. A ese procedimiento siguió poco después el FINGAL, realizado en Harwell (Reino Unido), en el que se producía, a la temperatura de 1050°C, un borosilicato vítreo que contenía del 25 al 40% en peso de desechos (en forma de óxidos).

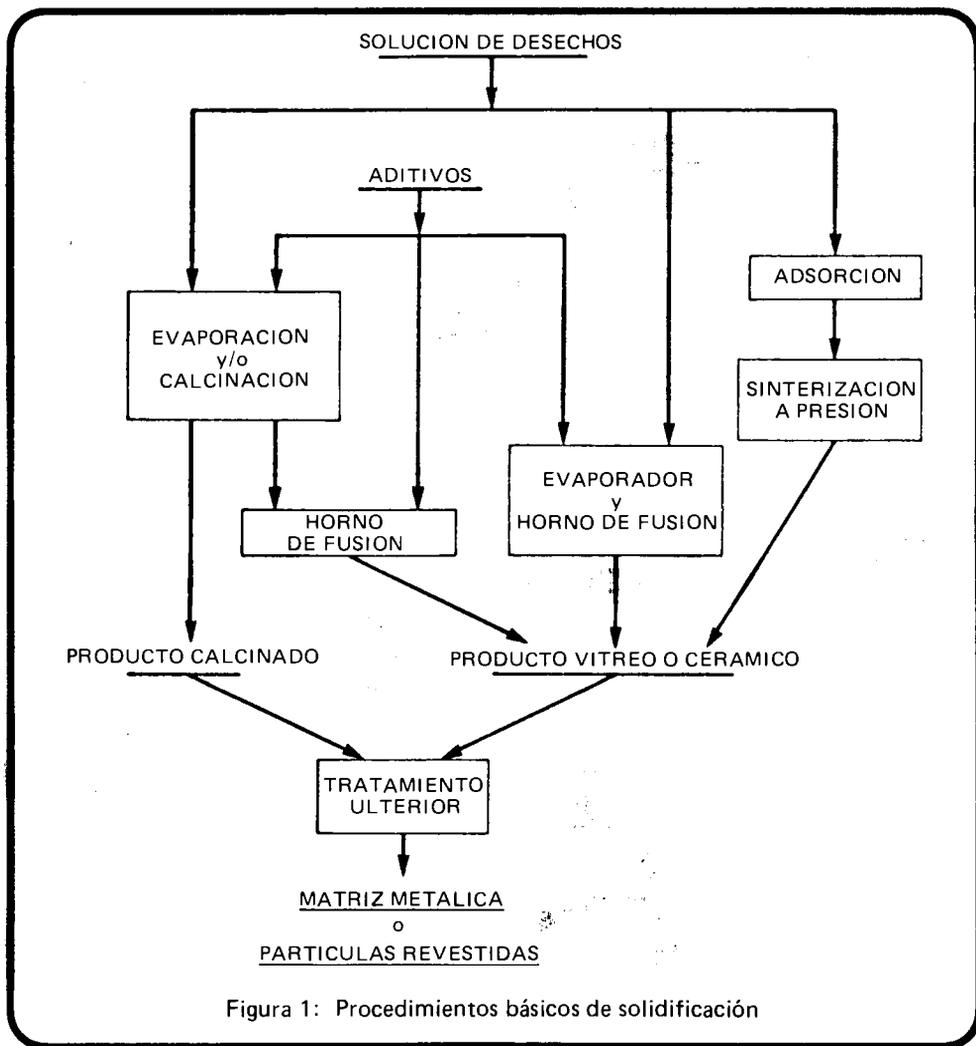


Figura 1: Procedimientos básicos de solidificación

A principios de los años sesenta se estudiaron muchos sistemas de solidificación en los Estados Unidos, y tres de ellos se eligieron para su demostración práctica en la planta Waste Solidification Engineering Prototype (WSEP), que funcionó en Richland (Washington) de 1966 a 1971.

La experiencia adquirida en el Reino Unido y los Estados Unidos hasta fines de los años sesenta se está aprovechando para ulteriores innovaciones en dichos países y también en otros.

Procedimientos del grupo segundo

Solo cuatro plantas han estado en funcionamiento o se están construyendo para tratar desechos procedentes de la reelaboración de combustible a escala industrial. Desde 1963, se han solidificado desechos con un contenido aproximado de 70 megacurios de radiactividad, procedentes de la planta de tratamiento químico de la USAEC en Idaho, por calcinación en lecho fluidificado. En este procedimiento la solución de desechos se introduce atomizada en un lecho fluidificado y se calienta a 400–500°C para producir un material granular que

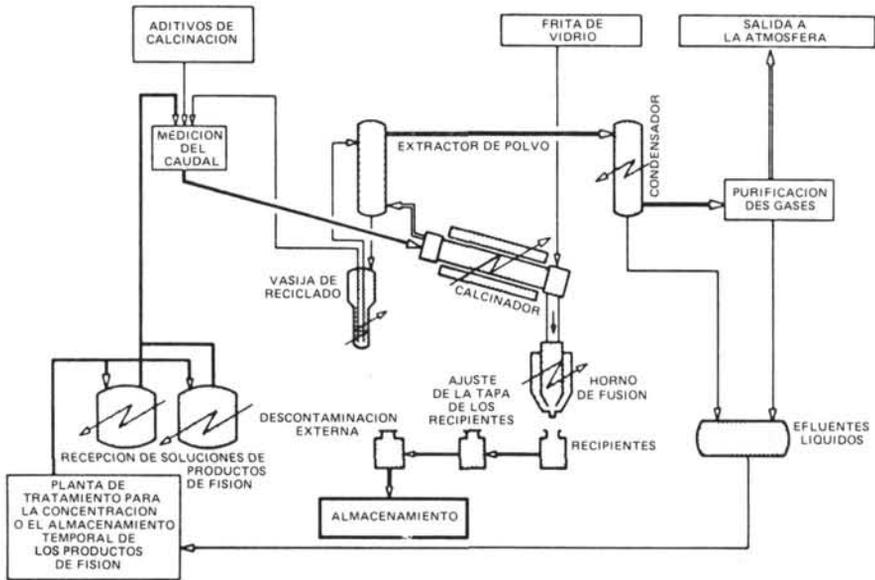
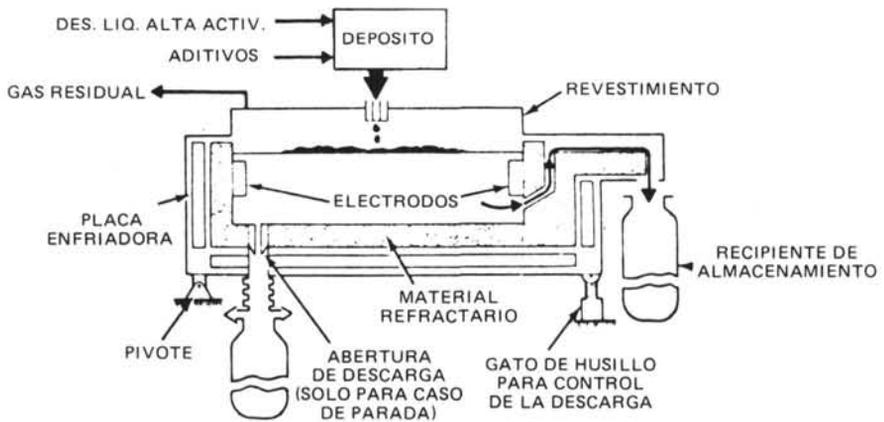


Figura 2: Esquema simplificado de una planta de vitrificación de Marcoule (AVM)



Dimensiones de la cámara de fusión	0,86 m anchura, 1,22 m longitud, 0,71 m fondo
Dimensiones externas	1,95 m anchura, 2,13 m longitud, 1,62 m altura
Altura material vítreo	0,48 m

Figura 3: Horno cerámico de fusión de alimentación líquida directa

fluye libremente y que se deposita en grandes tolvas enfriadas por aire, situadas en cámaras subterráneas. Actualmente se está construyendo una nueva planta que entrará en funcionamiento en 1980. Esta es en la actualidad la única planta que produce un material calcinado que se considera aceptable para las condiciones del lugar de evacuación. Los desechos tratados provienen de la reelaboración de elementos combustibles muy enriquecidos, que tienen solo del 0,1 al 1,0% de la radiactividad específica y tasa de generación de calor propias de los desechos de los reactores de potencia industriales.

En Francia funcionó de 1969 a 1973 la planta piloto PIVER, que transformó desechos procedentes de la planta de reelaboración de Marcoule, que contenían 5 megacurios de radiactividad, en un borosilicato vítreo. Los desechos se mezclaban con frita de vidrio, se calcinaban a 300°C y a continuación se elevaba la temperatura hasta fundir la mezcla. El producto fundido se trasladaba entonces de la vasija de tratamiento a un depósito. Se comprobó que esto podía repetirse hasta 30 veces antes de que tuviera que sustituirse la vasija de tratamiento. Este procedimiento ha sido ahora reemplazado por otro continuo de dos fases (AVM), que ha comenzado justamente a utilizarse con desechos radiactivos. La planta AVM consiste en un horno calcinador rotativo acoplado a un horno de fusión. La Figura 2 muestra un esquema simplificado del proceso de tratamiento. El horno calcinador tiene una capacidad nominal de 40 litros/h, y la unidad de vitrificación, una capacidad máxima de 20 kg de producto vitrificado por hora. Todos los desechos generados en Marcoule se vitrificarán en esta planta y se va a construir otra análoga en La Hague (AVH) para los desechos de alta actividad resultantes de la planta de reelaboración.

En Tarapur (India) se está construyendo una planta basada en un procedimiento semicontinuo de vitrificación, que comprende la calcinación seguida de fusión en la vasija de tratamiento y el vertido consecutivo del vidrio en un contenedor. Entrará en servicio en 1980.

Procedimientos del grupo tercero

En el Reino Unido, Los Estados Unidos, la República Federal de Alemania y la Unión Soviética se encuentra en avanzada fase de desarrollo un buen número de procedimientos.

El programa de desarrollo HARVEST en el Reino Unido, cuyo fin es una ampliación del procedimiento FINGAL, permitirá la construcción de una planta para el tratamiento en gran escala de desechos radiactivos en Windscale, programada para los últimos años ochenta. Se trata de un proceso discontinuo de una sola fase en el que la solución de desechos y los aditivos vitrificantes se introducen en una vasija cilíndrica de hasta 61 cm de diámetro, y la evaporación, desnitrificación y fusión tienen lugar en dicha vasija, dando como producto un borosilicato vítreo.

En los Estados Unidos se están estudiando actualmente una serie de procedimientos, de los cuales los dos más prometedores son el de calcinación por atomización con fusión en contenedor y el de fusión de material cerámico con alimentación directa de líquido. El procedimiento de calcinación por atomización fue uno de los estudiados en la planta WSEP. Los desechos líquidos se atomizan en la parte superior de la cámara calentando a 750°C, y las gotitas se evaporan y calcinan al caer a través de la zona caliente. En el fondo se mezclan con frita de vidrio y caen directamente en el contenedor final, situado en el horno de fundición. La masa se funde y el contenedor se traslada seguidamente al lugar de almacenamiento.

Un segundo procedimiento empleado en los Estados Unidos consiste en un horno de material cerámico en el que la energía de fusión se genera haciendo pasar una corriente alterna entre los electrodos insertados en el vidrio. Inicialmente esta unidad estaba acoplada a un calcinador de lecho fluidificado en el que se calcinaba la solución de desechos. El material calcinado se mezclaba seguidamente con frita de vidrio pulverizada y la mezcla se vertía sobre el vidrio

fundido en el horno de material cerámico. Este conjunto funcionó con gran éxito y se demostró su regularidad de comportamiento para un gran caudal de materiales, de forma que se realizaron ensayos en los que la solución de desechos se mezcló con frita de vidrio y se introdujo directamente en el horno de material cerámico. Si bien los caudales de material no fueron tan elevados, este procedimiento, de una sola etapa, dio tan buenos resultados que ahora se está ensayando en la práctica una versión ampliada. Para vaciar el vidrio fundido del horno de material cerámico, este último se inclina ligeramente a fin de que el vidrio caiga en el contenedor. Cuando el contenedor está lleno, el horno vuelve a su posición para cortar el vertido (véase la Figura 3).

En la República Federal de Alemania (Karlsruhe) y en la Unión Soviética se están estudiando también fundidores análogos de material cerámico. En la instalación de Karlsruhe, la mezcla solución de desechos/frita se atomiza sobre vidrio fundido. El vaciado se hace por una salida en la parte baja de la instalación, salida normalmente taponada por un electrodo que se calienta y se retira parcialmente para efectuar el vertido. La instalación de la Unión Soviética se alimenta directamente con líquido (no atomizado) y este es uno de los pocos procedimientos en que el producto es un fosfato vítreo en lugar de un borosilicato.

En la República Federal de Alemania se están estudiando otros dos procedimientos. La compañía Gelsenberg A.G., en colaboración con la compañía Euroquímica está desarrollando el procedimiento PAMELA, en el cual la solución de desechos se concentra y desnitrifica y se vitrifica a continuación. La masa fundida se transforma en gránulos o perlas de vidrio, que seguidamente se incorporan a una matriz metálica. Este procedimiento presenta varias diferencias importantes en comparación con los descritos anteriormente. La producción de gránulos es un proceso continuo en el que puede efectuarse fácilmente el muestreo y control de calidad. El producto acabado, con su matriz metálica, posee una conductividad térmica muy superior, de modo que pueden fabricarse bloques más grandes y al mismo tiempo su temperatura de almacenamiento puede ser menor.

El procedimiento FIPS, que se está estudiando en Jülich (República Federal de Alemania), es dos fases en las que la solución de desechos mezclada con frita de vidrio se deshidrata en un secador del que el material se saca con raspadores y cae en un contenedor donde es fundido.

Procedimientos del grupo cuarto

Se encuentran en fase inicial de desarrollo varios otros procedimientos, algunos de los cuales son muy parecidos a los ya descritos. En este artículo solo se mencionan los que presentan diferencias importantes.

El procedimiento LOTES se está estudiando en Euroquímica para aplicarlo a desechos de alto contenido de aluminio. Estos se transforman en un fosfato de aluminio cerámico, de forma granular, en una vasija de reacción cuyo fondo es agitado, a la temperatura de 550°C, y seguidamente se incorporan en una matriz metálica a 350°C, con lo que se evitan las altas temperaturas de los procedimientos de vitrificación.

Los investigadores del Laboratorio Sandia (Estados Unidos), del Japón y de Suecia están estudiando procedimientos basados en la absorción de los desechos en materiales inorgánicos de intercambio iónico, que se sinterizan a continuación.

En los Estados Unidos, la tecnología de los combustibles en forma de partículas revestidas se está adaptando para obtener revestimientos impermeables en partículas de desechos calcinados, tales como las que se producen en un calcinador de lecho fluidificado. Las partículas revestidas pueden incorporarse seguidamente en una matriz metálica.

Sistemas de tratamiento de gases residuales

La mayor parte de los procedimientos de solidificación requieren operaciones de evaporación y de desnitrificación. Además de vapor de agua y óxidos de nitrógeno, los gases residuales suelen contener en suspensión partículas finas y radionucleidos volátiles. El sistema de tratamiento tiene que interceptar todo este material radiactivo en suspensión y garantizar que las emisiones a la atmósfera se ajusten a límites aceptables.

En general, los gases residuales de la unidad de solidificación pasan primero por un filtro o bien van directamente a un condensador o purificador por vía húmeda. El condensado o licor de purificación se introduce en un evaporador-fraccionador. El concentrado del evaporador retorna a la alimentación de la unidad de solidificación y los vapores del evaporador se purifican de forma que el agua y el ácido nítrico destilados puedan volverse a aprovechar. Los gases residuales del fraccionador se purifican de nuevo y pasan por un filtro final antes de su emisión a la atmósfera. En algunos casos, se usa un filtro especial de rutenio.

El sistema de tratamiento de gases residuales de la instalación de calcinación de desechos de Idaho es algo más complejo, pues el caudal de materiales tratados es hasta 100 veces mayor, debido principalmente al gran volumen del aire de fluidificación utilizado. Un sistema único en su género era el que se aplicaba en la planta FINGAL, donde los gases residuales pasaban a través de filtros de adsorción de alto rendimiento antes de la condensación y se lograban altos factores de descontaminación por filtración en seco.

Situación actual y perspectivas futuras

Un procedimiento de solidificación de desechos ha de funcionar con niveles muy altos de radiactividad e implica temperaturas elevadas. Esta combinación de factores es una de las que más dificultades crean en la gestión de desechos nucleares. Si bien se ha adquirido mucha experiencia sobre cómo hacer frente a la radiactividad en operaciones tales como la disolución de combustibles, reelaboración, evaporación de desechos de alta actividad y su almacenamiento en depósitos, el tener que manipular los materiales radiactivos a altas temperaturas es un obstáculo suplementario que impone exigencias muy rigurosas a la concepción de las plantas y la pericia del personal operador.

En los últimos quince años se ha adquirido experiencia con el funcionamiento de una serie de plantas piloto (PIVER, FINGAL, WSEP, así como la WCF de Idaho) y se han transformado en productos sólidos desechos con más de 100 megacurios de radiactividad. Recientemente ha comenzado a funcionar en Francia una planta a escala industrial (AVM), y se están construyendo otras varias para tratar los desechos de las instalaciones industriales de reelaboración.

Paralelamente a este proceso de desarrollo, se han realizado importantes trabajos para estudiar y evaluar las propiedades a largo plazo de los productos solidificados. Tras la labor inicial sobre la calcinación de desechos radiactivos, los esfuerzos se consagraron principalmente a los materiales vítreos y cerámicos, tanto borosilicatos como fosfatos. A últimos de los años sesenta, los estudios experimentales comenzaron a mostrar claramente que, a largo plazo, podría obtenerse mayor fiabilidad con borosilicatos vítreos y cerámicos para la mayor parte de los tipos de desechos que es de prever interesen en el futuro. En el Colección de Informes Técnicos del OIEA se va a publicar con el título "Characteristics of Solidified High-Level Waste Products" un análisis detallado de las propiedades de los muchos productos prometedores que se están estudiando.

Considerados juntamente, este nuevo informe técnico y el volumen N^o 176 mencionado al principio, indican que hoy día se dispone de la tecnología apropiada para el proyecto y

construcción de una planta de solidificación de desechos muy radiactivos, y que el producto debe ser adecuado para su almacenamiento y evacuación a largo plazo.

De todas formas, es evidente que los programas de investigación y desarrollo que actualmente se realizan en muchos países permitirán nuevas mejoras. Esos programas tienen por objeto conseguir perfeccionamientos en la tecnología de los procesos, en la normalización de los criterios aplicables a los productos, y en los aspectos económicos. Se adquirirá cada vez más confianza en la capacidad de los diferentes productos para resistir los efectos a largo plazo de las radiaciones, el calor y el medio en que se depositen.

En el futuro se conseguirá más información gracias a estos trabajos de desarrollo e investigación. Otros procedimientos, sistemas y tipos de productos alcanzarán su madurez en los próximos diez años, contribuyendo así a acrecentar la confianza en que todos los desechos de alta actividad que se produzcan más adelante puedan solidificarse de manera adecuada, lo que es un requisito esencial para la evacuación de los mismos a largo plazo.