Informes nacionales:

Política y práctica en la India

Resumen técnico de programas y planes

por N.S. Sunder Rajan

En el programa nuclear de la India se ha previsto un ciclo de combustible totalmente autosostenido a base de los recursos nacionales. Desde el principio se hizo necesario evaluar los posibles riesgos de los desechos radiactivos en las diferentes etapas del ciclo que abarcan desde la extracción, el tratamiento y la fabricación de combustible, hasta la explotación del reactor y, por último, la reelaboración del combustible irradiado. Se destacó la necesidad de conocer el efecto de las descargas de desechos radiactivos en el medio ambiente y de crear tecnologías para aislarlos y contenerlos de forma eficaz. La experiencia acumulada durante decenios ha demostrado que las prácticas actuales son seguras.

No obstante, constantemente se trata de utilizar nuevas tecnologías para reducir aún más los escapes de radiación. Transcurrió más de un decenio de investigación básica y desarrollo en diferentes esferas de la ciencia y la tecnología nucleares antes de que se aplicara el programa nucleoeléctrico en la India, y numerosos han sido los estudios y las actividades que se han orientado hacia la formulación de una política nacional sobre la gestión de desechos radiactivos.

Políticas y objetivos

La cuestión de la manipulación de los desechos radiactivos presenta evidentemente una sola alternativa, la de mantener los desechos bajo control o liberarlos de él. Sin embargo, como es bien conocido, esta alternativa aparentemente simple es muy difícil de llevar a la práctica, debido a que cualquier decisión tiene consecuencias económicas, sociales, o de otro tipo, de largo alcance.

En principio, el programa de la India prevé dos métodos distintos para la evacuación definitiva de los desechos radiactivos: el almacenamiento tecnológico prolongado cerca de la superficie de los desechos de actividad baja e intermedia, y la evacuación geológica a gran profundidad para los desechos de alta actividad (DAA) y los portadores de emisores alfa. Si bien se están estudiando otras opciones, como el emplazamiento subterráneo a mediana profundidad para desechos de actividad intermedia, en la estrategia actual no se incluyen estos métodos de evacuación.

Gran parte del futuro programa de la India está relacionado con los desechos DAA y emisores alfa. Una esfera que presenta problemas y que debe recibir atención es la relativa al desarrollo de matrices perfeccionadas para incorporar los DAA, particularmente con respecto a la estabilidad a largo plazo del producto solidificado frente a la radiación y el envejecimiento. Otro aspecto está relacionado con el desarrollo de procesos viables desde el punto de vista técnico y económico para abordar el problema de los radionucleidos portadores de emisores alfa presentes en los DAA. Este trabajo revestirá gran importancia en un futuro cercano cuando se comience a aplicar el programa de reactores rápidos en la India.

Los esfuerzos futuros estarán dirigidos asimismo a hacer pruebas, con datos de experimentos sobre el terreno, que establezcan un adecuado grado de confianza en la evacuación geológica a gran profundidad de los productos de los DAA vitrificados. Con respecto a la gestión de los desechos de actividad baja e intermedia, se ha adquirido una buena experiencia y se espera que los programas para la gestión de los DAA que pronto entrarán en vigor también constituyan un paso de avance en la consecución de los objetivos que se ha trazado la India.

Política de gestión

Los amplios principios generales que rigen la política de gestión de la India son:

- Toda descarga de desechos líquidos o gaseosos radiactivos en el medio ambiente debe tener los más bajos valores razonablemente posibles, habida cuenta de los factores económicos y sociales (el principio ALARA de protección radiológica).
- Los desechos sólidos primarios acondicionados y los productos de desecho que se obtienen del acondicionamiento de los desechos líquidos provenientes de la explotación de los reactores y de los laboratorios de investigación se han de almacenar en instalaciones especiales a poca profundidad construidas al efecto. También se permite almacenar en esas instalaciones los desechos acondicionados de actividad baja e intermedia, junto con las cantidades de trazas de contaminación alfa que se producen en la explotación de las unidades de reelaboración de combustible.
- Antes de su acondicionamiento, los desechos líquidos de actividad alta procedentes de las plantas de reelaboración al inicio se almacenan provisionalmente en un depósito subterráneo en tanques de acero inoxidable de alta integridad. Estos desechos se vitrificarán para almacenarlos provisionalmente en instalaciones tecnológicas construidas a poca profundidad. Esto permitirá disminuir el calor y facilitará asimismo la garantía de la calidad de los productos de desechos

El Sr. Rajan es Jefe de la División de Gestión de Desechos del Centro de Investigaciones Atómicas de Bhabha, Trombay, India.

solidificados antes de que sean transportados y ubicados en un repositorio centralizado.

- Los desechos acondicionados de actividad alta y emisores alfa serán evacuados en un repositorio centralizado en formaciones geológicas profundas.

Desechos procedentes de la extracción y el tratamiento

Los minerales de la India, que generalmente contienen cerca del 0,1% de óxido de uranio (U_3O_8) se extraen por métodos convencionales. Los métodos de extracción por vía húmeda y de ventilación adecuada se utilizan para la protección contra la excesiva concentración de radiaciones. El "líquido estéril" derivado del proceso de recuperación del uranio se trata con cal y baritina para obtener la precipitación del radio y otros nucleidos hijos de uranio. Junto con las colas de fabricación, éste se descarga en una piscina de residuos, que es una depresión natural que garantiza su sedimentación. Se controlan los sobrantes de la piscina para garantizar que la contaminación que contengan esté por debajo de la permitida para el radio y otros nucleidos, como el manganeso.

Desechos de actividad baja e intermedia procedentes de los reactores y el proceso de reelaboración

En la explotación del reactor el problema principal desde el punto de vista de la gestión de desechos radiactivos es que el refrigerante se contamine con los productos de la activación, la corrosión y la fisión. Los radionucleidos más importantes son el cesio 137, el estroncio 90 y el yodo 131, como productos de la fisión, y el cobalto, el hierro, el níquel y el cromo, como productos de la corrosión y la activación.

Los desechos líquidos de actividad baja se tratan por métodos químicos, de intercambio iónico y evaporación. Generalmente los desechos son tratados previamente para adaptarlos por medios químicos a un índice de acidez adecuado. Posteriormente, se añaden en un mezclador instantáneo productos químicos como fosfatos, ferrocianuros e iones férricos, tras lo cual se separan los líquidos de los sólidos en los clarificadores de precipitantes y en los eliminadores de lodo. En general se obtuvieron hasta 200 factores de descontaminación.

Se utilizan también técnicas de intercambio iónico para retener los radionucleidos específicos de la mayor parte de los desechos. Los posibles materiales de intercambio iónico (vermiculita, bentonita) se explotan ampliamente tanto en las columnas no regenerativas como en las operaciones in situ. Los intercambiadores de iones sintéticos también se utilizan como un método de descontaminación en vista de su naturaleza regenerativa y mayores capacidades de intercambio.

En las corrientes de desechos líquidos de actividad intermedia procedentes de las plantas de reelaboración de combustible se encuentran, por ejemplo, los concentrados de soluciones utilizadas en la limpieza con disolventes para el tratamiento con evaporadores y los materiales fisionables transportados por las aguas del proceso de descontaminación.

La evaporación en aparatos de vapor se utiliza como método de concentración de una etapa para los desechos que tienen una actividad específica relativamente alta. Los evaporadores de circulación natural, acoplados a los componentes teleguiados fabricados al efecto, producen grandes reducciones de volumen. Se han logrado factores de descontaminación del orden de 10^6.

Con la continua tendencia a disminuir hasta el nivel más bajo posible las descargas de radiactividad en el medio ambiente, se ha logrado hacer grandes reducciones de volumen (prácticamente sin ninguna emanación) en la instalación de evaporación solar sin ebullición de la central atómica de Rajasthan. Este emplazamiento ofrece condiciones climatológicas favorables, como por ejemplo, altas temperaturas ambientales, baja humedad y fuertes velocidades del viento, que son necesarias para este tipo de instalación.

Inmovilización de desechos

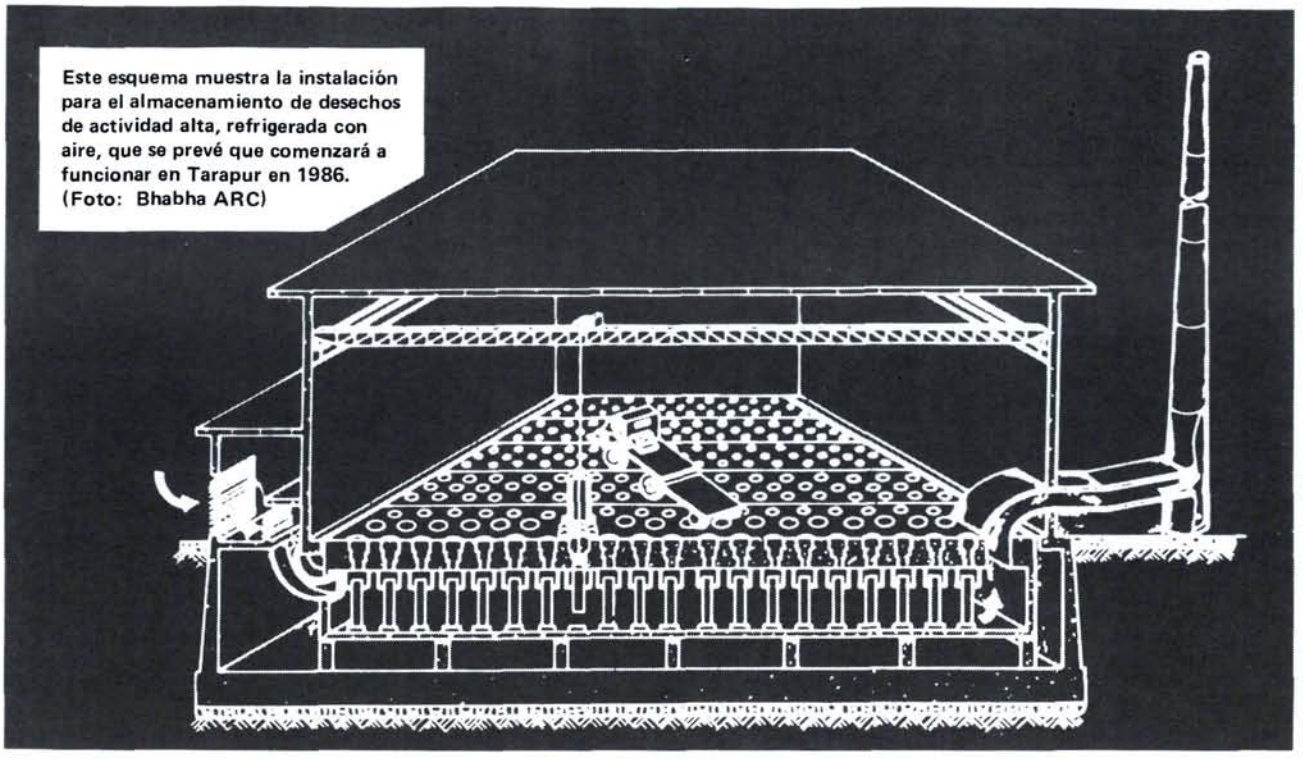
Los criterios para el acondicionamiento de los concentrados de desechos radiactivos dependen generalmente de la concentración de la radiactividad de los desechos, su compatibilidad con el medio al que se han de incorporar y las condiciones del lugar donde se planifica el almacenamiento prolongado y la evacuación de los desechos acondicionados. Se están utilizando diferentes matrices, como el cemento, el betún y los polímeros compuestos, para inmovilizar los concentrados de desechos de actividad baja e intermedia.

- *Cemento.* Debido a su bajo costo y adaptabilidad a las técnicas de elaboración simples, el cemento y los compuestos del cemento han tenido buena acogida como matriz de inmovilización para los concentrados de desechos de actividad relativamente baja. Sin embargo, su gran porosidad ha llevado a que se utilicen determinados aditivos, que actúan fundamentalmente como rellenos intersticiales activos, a fin de mejorar su durabilidad.

- *Betún.* El betún se ha escogido para incorporar los desechos de actividad intermedia debido a su capacidad para admitir corrientes acuosas con un gran porcentaje de sólidos disueltos y en suspensión; su adaptabilidad al proceso semicontinuo; y facilidad de manipularlo a distancia. Teniendo en cuenta las características del betún disponible en la región, se autoriza que el producto tenga hasta un 50% de sales. Se espera que la radiolisis del producto, con esta gama de sales y actividades de desecho, sea despreciable durante un almacenamiento prolongado.

La planta de bituminación de Tarapur tiene una capacidad prevista de 120 litros por hora para los desechos de actividad intermedia. Para lograr el doble objetivo de evaporar y mezclar, se han utilizado evaporadores de capas delgadas por agitación que se calientan externamente mediante la circulación del fluido térmico. El producto resultante se vierte cerca del fondo del evaporador en bidones de acero fabricados a la orden. El proceso es semicontinuo y produce cerca de 1000 bidones de desechos bituminados al año. Estos bidones de productos se almacenan subterráneamente en "pozos de azulejos" revestidos de acero.

- *Matrices de polímeros.* Las matrices de polímeros (impregnadas con barreras) se utilizan para inmovilizar los desechos que generan un bajo calor y que se producen



Este esquema muestra la instalación para el almacenamiento de desechos de actividad alta, refrigerada con aire, que se prevé que comenzará a funcionar en Tarapur en 1986. (Foto: Bhabha ARC)

en la reelaboración de combustibles específicos. En este sistema se utilizan finos de vermiculita que actúan como barreras para atrapar radionucleidos específicos. Posteriormente se inmovilizan con una resina de poliestireno insaturada con tratamiento catalítico de curado en condiciones normales y se obtiene un producto monolítico con buena homogeneidad y durabilidad química. El contenido en desechos es de hasta un 50% por volumen. Hasta el momento se han inmovilizado con éxito en esta matriz de polímero cerca de 250 000 litros de esos desechos, con una radiactividad total de un millón de curios aproximadamente.

Desechos altamente radiactivos

La corriente de desechos líquidos altamente radiactivos procedente de unidades de reelaboración de combustible se almacena en la actualidad en tanques de acero inoxidable de alta integridad. Estos se encuentran situados en cámaras subterráneas forradas con acero inoxidable para proporcionar una contención secundaria así como un blindaje biológico. Para la gestión de estos desechos se ha elaborado un programa trietápico: 1) fijación de los óxidos de desecho en matrices sólidas; 2) almacenamiento tecnológico de los desechos solidificados durante 25 años aproximadamente; y 3) evacuación de los desechos solidificados.

Sobre la base de los exámenes técnicos y económicos, se ha previsto disponer el almacenamiento provisional de los desechos radiactivos en tanques, durante unos 3 a 5 años, en complejos para la reelaboración de combustible.

Para la incorporación de óxidos de los DAA, las matrices de material vítreo y otras matrices de cerámica satisfacen los criterios de aceptabilidad. Las ventajas del vidrio de borosilicato como matriz son las siguientes: buena resistencia a la lixiviación; alta estabilidad radiológica y térmica; alta resistencia mecánica; y facilidad relativa para la manipulación y el transporte.

Planta de inmovilización de desechos de Tarapur

En Tarapur funciona la primera planta de inmovilización de desechos de alta actividad, que utiliza las matrices y los procesos de fusión ya desarrollados. La planta emplea una matriz de borosilicato para la incorporación de óxidos de desecho y se basa en un proceso semicontinuo de "vitrificación" que comprende la calcinación y más tarde la fusión en la vasija de elaboración. Posteriormente, el vidrio se encapsula en el recipiente de almacenamiento. El equipo de la planta se ha dispuesto de forma tal que facilite la separación de las actividades, de manera que sea fácil dar servicio de mantenimiento a las secciones de la planta y, cuando sea posible, que éste sea menos mecanizado.

Recientemente se ha emprendido un proyecto para crear una planta de inmovilización de desechos en Trombay. Aunque el proceso básico empleado es similar al de Tarapur, el diseño del equipo, y en particular el módulo del horno, han sufrido importantes modificaciones. Se ha programado que la planta comience a funcionar en 1990. Otra planta, en Kalpakkam, se encuentra en la etapa de planificación, y su puesta en funcionamiento se ha proyectado para 1993. Se espera que esta planta cuente con una unidad incorporada para la manipulación de los desechos procedentes de la reelaboración del combustible de un reactor reproductor rápido de ensayo.

Almacenamiento provisional de los desechos de alta actividad

Ya se ha reconocido ampliamente la necesidad del almacenamiento tecnológico provisional, bajo vigilancia constante, de los productos de desecho de alta actividad (DAA) acondicionados. Entre los diversos conceptos de refrigeración opcionales, se ha seleccionado un sistema de refrigeración con aire (corriente natural inducida) para la instalación de Vigilancia del Almacenamiento de Desechos Sólidos (SSSF) de Tarapur. Esta instalación, que comenzará a funcionar en 1986, dará

respuesta a las necesidades de almacenamiento de los productos de desecho acondicionados de la planta de desechos y de la instalación de Trombay durante un período de 25 años, y llevará a cabo actividades continuas de vigilancia, refrigeración y observación.

Los objetivos básicos del diseño de la instalación para la vigilancia del almacenamiento de desechos sólidos consisten en garantizar la integridad del producto y el contenedor en todo momento; proporcionar posibilidades de almacenamiento con refrigeración constante a fin de eliminar el calor de desintegración; y garantizar la recuperación de los recipientes de desechos en cualquier circunstancia. El sistema de refrigeración utiliza el calor de desintegración, y un tubo de aireación diseñado adecuadamente, para impulsar el movimiento del aire a través de la cámara de almacenamiento. Este sistema es autorregulado y puede compensar los cambios debidos a la carga de calor y a las condiciones del tiempo.

Evacuación: desechos de período corto

El aislamiento subterráneo de los desechos radiactivos parece ser en el presente la opción de evacuación más viable. Los desechos radiactivos de actividad baja y de período corto, embalados y acondicionados, se reciben, trasladan y emplazan en repositorios construidos a poca profundidad. La experiencia de la India indica que para lograr el objetivo global de la seguridad ambiental y operacional es prácticamente inevitable aceptar y adoptar un enfoque de sistema total en el diseño, emplazamiento y operación de estos repositorios a poca profundidad.

En general, los tipos de módulos de evacuación que se utilizan en los repositorios de la India consisten en zanjas de cemento y hormigón armado y pozos de losas de hormigón revestidos de acero. Debido a las condiciones hidrológicas variables de los diferentes emplazamientos de repositorios a poca profundidad del país, es necesario estudiar en cada lugar las características específicas que influirían en el desarrollo y diseño del repositorio.

El concepto de diseño y desarrollo de los repositorios a poca profundidad ha estado sometido durante años a una evaluación constante. Algunas características importantes que diferencian el enfoque actual de la India del de etapas anteriores se relacionan con el establecimiento de una zona de separación apropiada entre las zonas operacionales del repositorio y sus límites externos; el aislamiento completo, incluso en la etapa de diseño, de las instalaciones administrativas y de servicio de las zonas operacionales del repositorio; la construcción de las instalaciones que puedan requerirse para separar los desechos y, cuando sea necesario, ponerles un envase adicional o reempaquetarlos; y la creación de zonas y el suministro de equipo para los fines de la descontaminación. Para mantener la integridad y la vigilancia ordinaria de estas instalaciones, se aplican varios controles posoperacionales de observación y otros tipos de fiscalización institucional.

Evacuación: desechos de período largo

El contenido de elementos transuránicos de los desechos de alta actividad y los desechos portadores de emisores alfa puede constituir un riesgo durante períodos prolongados. Aunque se han examinado diversos conceptos de ingeniería y se dispone de una gama de posibles opciones, la evacuación en formaciones geológicas profundas es la que ha recibido la mayor atención en algunos países. En la India, la elección se limita a las formaciones de rocas ígneas y a algunos depósitos sedimentarios seleccionados. Algunas formaciones geológicas, sobre todo en el escudo peninsular meridional, al parecer ofrecen las condiciones para el almacenamiento a largo plazo e inclusive para la evacuación de desechos de alta actividad.

En el programa de la India se prevé en la actualidad la investigación de los posibles lugares de confinamiento en formaciones peninsulares de gneis y granito homogéneas y aglomeradas. A este respecto, se ha establecido una estación experimental de investigaciones en una sección sin uso de una mina subterránea situada en Kolar, cerca de Bangalore. Se están llevando a cabo estudios encaminados a investigar la conveniencia de utilizar estas formaciones como repositorio definitivo. Se han autorizado experimentos in situ para examinar el comportamiento térmico, mecánico, hidrológico y químico de la roca hospedante en condiciones simuladas.

Análisis de seguridad

Los tipos y cantidades de desechos para la evacuación en repositorios deben definirse y caracterizarse, tomando en cuenta los criterios relacionados con las dosis de radiación aceptables, las barreras de protección del repositorio y los factores técnicos. Debido a los plazos asignados, en el mejor de los casos, se puede pronosticar el comportamiento de estos lugares de evacuación. Entre las actividades de evaluación y valoración se incluyen la caracterización de los medios genéricos de la roca hospedante, la geohidrología circundante, y la interacción desechos-roca. El análisis de seguridad de los repositorios a poca profundidad entraña esencialmente el pronóstico de la distribución temporal y espacial de los radionucleidos a consecuencia de una liberación accidental.

Estimación de los desechos generados en la India

Los desechos sólidos primarios y los concentrados de desechos de actividad baja constituyen el principal elemento de generación de desechos que ha calculado la India hasta el año 2000, con una producción de energía eléctrica proyectada de 10 000 megavatios. Consisten estos desechos en productos contaminados tales como: equipo de elaboración, ropas protectoras, filtros para partículas usados, precipitados concentrados, y sedimentos de las plantas para el tratamiento de desechos líquidos de actividad baja. El volumen de los desechos de actividad intermedia y alta generados es pequeño, si bien éstos constituyen las fuentes más importantes de radiactividad.

	1985	2000
Capacidad instalada (megavatios-eléctricos)	1350	10 000
Desechos sólidos primarios* (metros cúbicos)	1850	107 000
Concentrados de desechos de actividad baja (metros cúbicos)	3000	77 100
Desechos de actividad intermedia (metros cúbicos)	800	19 900
Desechos de actividad alta (metros cúbicos)	450	8 000

* Hasta 10^4 röntgen por hora.