

emisores alfa, desechos de actividad alta, combustible agotado, fuentes de radiación selladas y agotadas, desechos provenientes de la clausura, y colas de la extracción y tratamiento del uranio.

La BDGD se estructurará para proporcionar un perfil general de los Estados Miembros en materia de gestión de desechos. Esta es una forma muy práctica de acopiar y producir datos, dado que los problemas de gestión de desechos que enfrenta el Organismo se relacionan directamente con las actividades específicas de los Estados Miembros. Este perfil de los Estados Miembros comprenderá información sobre el inventario actual de volúmenes de desechos, proyecciones en materia de volúmenes de desechos, actividades en materia de política y reglamentación, organización encargada de las actividades de gestión de desechos, estrategias nacionales, programas de investigación y desarrollo sobre gestión de desechos, actividades operacionales y novedades de importancia.

El objetivo inicial será el desarrollo de perfiles de gestión de desechos para los 31 Estados Miembros que explotan centrales nucleoelectricas o que tienen centrales nucleoelectricas en construcción. Una vez alcanzado este objetivo, los esfuerzos se dirigirán a elaborar e introducir en el sistema de base de datos perfiles para los Estados Miembros que generan desechos radiactivos solamente como consecuencia de aplicaciones de la energía nuclear. Se espera que la BDGD estará en funcionamiento a fines de 1990, aunque podría disponerse de algunas partes del sistema antes de esa fecha.

El Organismo utilizará la base de datos para mejorar el programa de gestión de desechos brindando rápido acceso a la información sobre actividades de los Estados Miembros en la materia. La información que contiene se utilizará para elaborar informes sobre la situación internacional en materia de gestión de desechos radiactivos y ayudar al Organismo a planificar y desarrollar sus propios programas de gestión de desechos. Se exhorta a todos los Estados Miembros a que participen en el desarrollo y el funcionamiento de la base de datos y que la utilicen para planificar y ejecutar los programas nacionales de gestión de desechos.

### Conclusiones

La gestión de desechos radiactivos es una actividad en perpetuo cambio, dado que los Estados Miembros se adaptan a los aspectos técnicos y a los aspectos de la aceptación por el público de las actividades que se realizan en la materia. Reconociendo esta característica, el programa de gestión de desechos del Organismo debe tener la correspondiente flexibilidad para adaptarse a las necesidades de los Estados Miembros realizando actividades que sean tan ventajosas como oportunas. Las nuevas iniciativas que se han descrito en el presente artículo representan los resultados de un continuo proceso de evaluación tendiente a elaborar servicios que resulten útiles a los Estados Miembros independientemente de la situación de sus respectivos programas de gestión de desechos. Esta evaluación continuará realizándose con arreglo a la determinación del Organismo en el sentido de cerciorarse de que los recursos se destinan a actividades que son de interés inmediato y de directa importancia para los Estados Miembros.

## Informe sobre el estado de la técnica de evacuación de desechos radiactivos

*Es posible almacenar y evacuar con seguridad diferentes tipos de desechos radiactivos, y de hecho se hace*

por Alf Larsson

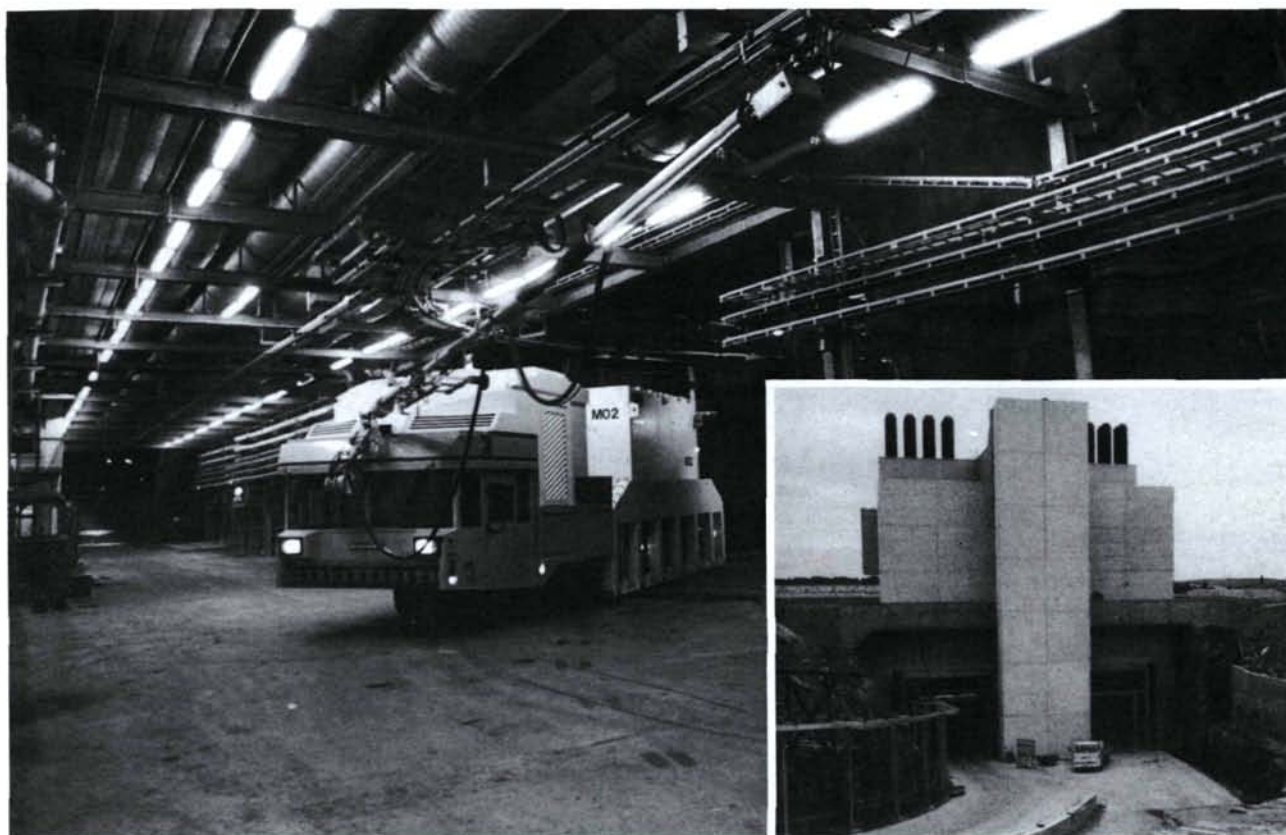
En vista de la considerable labor que se requiere para desarrollar repositorios de desechos radiactivos, se ha establecido en esta esfera una amplia cooperación internacional. En estas actividades participa también en gran medida el OIEA. El Organismo ha publicado varios informes, que abarcan diferentes aspectos de la evacuación de desechos. Por recomendación de su Comité de revisión técnica sobre la evacuación subterránea de desechos radiactivos (CRTES) el Organismo publicará un informe sobre el "estado de la técnica" de la evacuación de desechos radiactivos. Este informe está todavía en la fase de preparación. En este artículo se examinan los temas principales del futuro informe.

### Los desechos radiactivos y el ciclo del combustible nuclear

Las partes del ciclo del combustible nuclear en que se producen desechos radiactivos son la minería y el tratamiento de minerales de uranio, el proceso de enriquecimiento, las plantas de fabricación de combustible, la explotación de reactores nucleares, la reelaboración de combustible gastado y la clausura de instalaciones nucleares. La gestión y la evacuación seguras de los desechos nucleares es de importancia primordial para los países con programas nucleoelectricos. También otros países que utilizan sustancias radiactivas en hospitales e institutos de investigación deben hacer frente a problemas similares, aunque en menor escala.

El Sr. Larsson fue Director de la División de Desechos Nucleares del Inspectorado de Energía Nuclear de Suecia, en Estocolmo, y Presidente del Comité de revisión técnica del OIEA sobre la evacuación subterránea de desechos radiactivos. La labor del Comité es ahora continuada bajo los auspicios del Comité Asesor Internacional sobre Gestión de Desechos Radiactivos, del OIEA, que fue creado en 1989 para suministrar orientación en todos los aspectos de la labor del Organismo relacionada con este tema.





El repositorio sueco para desechos de actividad baja e intermedia está situado en la central nuclear de Forsmark. El repositorio, construido en la cavidad rocosa de una mina agotada, comenzó a funcionar en 1988. (Fotos: SKB.)

Se han propuesto varias alternativas para la evacuación de los desechos radiactivos. Excluidas las propuestas más exóticas que no parecen viables con la tecnología existente, por ejemplo, el envío de los desechos hacia el sol o el espacio ultraterrestre, o el empleo de transmutaciones en reactores de alto flujo de neutrones, hay dos principios básicamente diferentes para la gestión de los desechos radiactivos: la dispersión y el confinamiento.

Dispersión significa la liberación de radionucleidos en el medio ambiente, en el caso normal en una forma controlada a fin de que no tenga ningún impacto deletéreo sobre los seres humanos y la naturaleza.

El confinamiento implica la segregación de los radionucleidos del medio ambiente humano y la restricción de su liberación en ese medio ambiente en cantidades o concentraciones inaceptables.

La dispersión solo puede utilizarse para cantidades limitadas y concentraciones bajas de radionucleidos, a fin de respetar los principios de las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR). Los desechos radiactivos líquidos de actividad muy baja provenientes de las plantas de tratamiento de desechos de los reactores nucleares y las instalaciones de reelaboración se descargan actualmente en los ríos y en el mar. Durante muchos años, la dispersión se ha utilizado también para desechos sólidos en forma de vertimiento en el mar de material radiactivo de actividad baja. Esta práctica ha sido recientemente abandonada, por lo menos temporalmente, debido a una amplia oposición del público.

Para las cantidades importantes de desechos radiactivos, es necesario utilizar el confinamiento de los materiales durante períodos que dependen de las características del desecho, y sobre todo de su composición nuclear. Los desechos que contienen nucleidos de períodos cortos necesitan un confinamiento relativamente corto, de unos pocos cientos de años, mientras que los nucleidos de período largo pueden requerir confinamiento durante decenas de miles de años o más. Se está reconociendo que tras períodos largos, en algunos casos millones de años, cualquier desecho radiactivo confinado puede ser liberado y dispersado en el medio ambiente. No obstante, la radiactividad habrá disminuido a niveles muy bajos, que serán inferiores a las normas de dosis internacionalmente aceptables.

El principio de seguridad básico del confinamiento es "la defensa en profundidad". Este principio implica el empleo usual de varias "barreras", de ordinario independientes, para demorar o impedir la migración de radionucleidos de los desechos o del repositorio a los alrededores. Las barreras naturales son, en el caso de los repositorios geológicos profundos, la roca hospedante y la formación geológica circundante. Una barrera técnica es una característica hecha o modificada por el hombre; puede ser parte del embalaje del desecho o parte del repositorio.

Los repositorios de desechos radiactivos pueden clasificarse básicamente en tres grupos: instalaciones de evacuación poco profundas en tierra, instalaciones de evacuación a profundidades intermedias e instalaciones de evacuación en formaciones geológicas profundas. Se



cuenta con considerable experiencia en materia de evacuación de desechos de actividad baja en instalaciones de evacuación poco profundas. La evacuación a profundidad intermedia se practica en escala más limitada, y los repositorios geológicos profundos en general todavía no están en funcionamiento.

Los repositorios para desechos de actividad alta y combustible gastado están, con algunas excepciones, en la etapa de la investigación y la planificación. Se necesita todavía una labor considerable para desarrollar una metodología apropiada de emplazamiento y para encontrar lugares adecuados para este tipo de desechos. Muchos países han iniciado extensos programas de investigación y desarrollo para los desechos de actividad alta.

### Barreras naturales

Las barreras naturales constituidas por las rocas hospedantes son la principal justificación de la evacuación geológica. Una barrera se define como una característica que demora o impide la migración de radionucleidos de los desechos y/o del repositorio a sus alrededores.

A fin de evaluar la eficacia de las barreras naturales, así como de las barreras técnicas, es preciso considerar los aspectos del aislamiento físico, la hidrogeología y la geoquímica. Además, es preciso incluir el comportamiento de los radionucleidos en la biosfera, por ejemplo, la dilución y dispersión en el suelo, en los acuíferos poco profundos y las aguas superficiales, en la atmósfera y en la cadena alimentaria.

El emplazamiento de desechos debajo de la superficie aprovecha el manto rocoso como una barrera física contra los procesos de invasión que podrían causar liberaciones al medio ambiente, por ejemplo, intrusión humana deliberada o inadvertida, incendios, caída de aviones, inundaciones y huracanes. Las estructuras construidas bajo la superficie son también menos propensas a los daños producidos por terremotos y la roca actúa como un blindaje contra la radiación y como un sumidero para el calor radiogénico.

En general, la eficacia del aislamiento de los desechos, y también la conveniencia de los regímenes hidrogeológicos y geoquímicos, aumenta con la profundidad. Ahora bien, esto debe considerarse en relación con las limitaciones impuestas por la temperatura, la viabilidad técnica, la seguridad de explotación y los costos. El criterio para la selección de una profundidad definida de un repositorio puede variar mucho según el tipo de desecho, el concepto de evacuación y la roca hospedante. Esto implica que los criterios deben establecerse para cada emplazamiento.

Los repositorios ubicados cerca de la superficie tienden a tener un riesgo mayor de pérdida de aislamiento a causa de sucesos naturales, tales como tormentas y terremotos. Con frecuencia, estos repositorios dependen solo de las barreras técnicas para el aislamiento y para nada de la geosfera. Esto implica que tan pronto falla la barrera técnica, el desecho se libera directamente en la biosfera. Para los desechos de período corto, esta situación puede ser totalmente aceptable, pero no es así para los desechos de período largo.

**Hidrología.** El mecanismo más probable de liberación de radionucleidos de un repositorio comprende el ingreso de aguas subterráneas. Para los repositorios profundos, las características hidrológicas de la roca hospedante son, por lo tanto, de importancia fundamental. Los parámetros principales para caracterizar la hidrología son los caudales, las velocidades y las vías de las corrientes de agua. Dependen de las gradientes hidráulicas regionales y de las propiedades de la roca hospedante y las formaciones circundantes, tales como la porosidad y la permeabilidad. Es necesario conocer las características hidrológicas para desarrollar un modelo matemático del sistema.

Se están considerando los yacimientos de sal y de anhidritas como posibles formaciones hospedantes para repositorios de desechos de actividad alta del tipo de roca seca. Si bien todas las rocas contienen algo de agua, las rocas tales como la sal y la anhidrita aparentemente no contienen poros llenos de agua conectados que puedan constituir una vía para el transporte de radionucleidos disueltos. Ahora bien, las perturbaciones mecánicas durante la construcción del repositorio o los campos de temperatura radiogénica pueden causar alguna migración de inclusiones fluidas. En el escenario de evolución normal, no se produciría ninguna liberación de tales repositorios mientras la roca hospedante permaneciera intacta. La instalación WIPP de los Estados Unidos es un ejemplo de repositorio en un depósito estratificado de sal. La instalación de Gorleben, en la República Federal de Alemania, es un ejemplo de un emplazamiento que se investiga para instalar un repositorio en una bóveda de sal.

Ciertos emplazamientos de evacuación próximos a la superficie y los emplazamientos de evacuación profundos en climas áridos pueden ubicarse por sobre el nivel hidrostático. Por lo tanto, la roca hospedante no está saturada, lo que indica que los poros conectados de la roca no están totalmente llenos de agua. El grado de no saturación varía entre los diferentes sistemas y puede, por cierto, cambiar estacionalmente. Las sequías y las tasas muy bajas de movimiento de las aguas que a menudo se encuentran en tales rocas las convierten en candidatas atractivas para la evacuación de desechos. Todo transporte de agua que pudiera ocurrir se realizaría a través de un sistema de microporos que tendría un gran potencial para la retardación de los radionucleidos por procesos de sorción y que actuaría también como filtro para especies coloidales. La Montaña de Yucca, en el sitio de ensayos de Nevada, en los Estados Unidos, es un ejemplo de emplazamiento de repositorio en la zona no saturada. La roca está compuesta de toba riolítica densamente compuesta.

En todo el mundo, la mayoría de las actividades se concentran actualmente en la evacuación en rocas saturadas, ya que tales rocas son comunes en la mayoría de los países con programas nucleares. Las rocas saturadas se suelen clasificar como porosas o fracturadas.

En una situación ideal, las rocas porosas no debieran tener discontinuidades estructurales importantes; el flujo del agua (o la difusión de los nucleidos en el caso en que los flujos sean ínfimos) debe ocurrir de manera uniforme en la masa de la roca. Las velocidades del agua a través de tales rocas debe ser muy pequeña y se debe disponer de toda la matriz de la roca para sorción. En la práctica,



las rocas porosas están incrustadas en estratos con propiedades bastante diferentes de la roca hospedante, lo que complica mucho más la hidrología.

En muchas rocas, el flujo se produce sobre todo en características distintas y aisladas, clasificadas por lo general de "fracturas". Estas comprenden una amplia gama de discontinuidades geológicas. Las propiedades hidrológicas generales de tales rocas, por ejemplo, los granitos y las arcillas, pueden ser muy atractivas ya que poseen flujos y velocidades del agua bajos. Ahora bien, la caracterización de sus propiedades hidrológicas plantea muchos problemas.

Varios países, por ejemplo, Canadá, Suecia y Suiza, tienen amplios programas de desarrollo de repositorios profundos para desechos de actividad alta en rocas saturadas, que comprenden investigaciones de emplazamientos y laboratorios de ensayo subterráneos. El repositorio subterráneo sueco SFR para desechos de actividad baja e intermedia sirve de ejemplo de instalación operacional en roca saturada.

**Geoquímica.** Las propiedades geoquímicas de la roca hospedante la convierten en barrera, al proporcionar un medio que lentifica o impide la degradación de las barreras técnicas y, en el caso de pérdida total de la contención en el repositorio, limita la tasa de movilización y transporte de radionucleidos. Las propiedades de un sistema geoquímico determinado dependen también mucho del tipo de desecho y del diseño del repositorio.

**Selección del emplazamiento.** La selección y caracterización de un emplazamiento para la evacuación de desechos radiactivos se efectúa en varias etapas. Por lo general, se realiza un estudio para determinar zonas generales adecuadas según los criterios establecidos para el repositorio. Se seleccionan luego unas pocas áreas para nuevos estudios. Es preciso realizar estudios de campo y, en el caso de emplazamientos para evacuación subterránea, hay que efectuar perforaciones de sondeo para caracterizar los emplazamientos. La preparación de modelos de hidrología es una parte importante de esta caracterización.

Si bien el emplazamiento de un repositorio lejos de características volcánicas tiene ventajas evidentes, la ubicación con respecto a las fallas principales no está tan clara. Si bien es evidentemente conveniente que ninguna falla importante penetre en el repositorio, dado que esa característica es una vía de transporte potencial, representa también una debilidad en la que se producirá movimiento en respuesta a la acumulación de tensiones tectónicas, disminuyendo así las posibilidades de que ocurran nuevas fisuras en la zona del repositorio. Además, las fallas predominantes alrededor de un repositorio tienden a aislar el repositorio de las corrientes de agua subterráneas. En el estudio sueco KBS-3 hay ejemplos de este enfoque.\*

Para todos los tipos de repositorio, pero particularmente los que están cerca de la superficie, deben considerarse cuidadosamente los escenarios de intrusión humana. Un emplazamiento cuidadosamente escogido lejos de recursos naturales puede reducir ese riesgo al mínimo.



En Francia, el emplazamiento de evacuación de La Manche incorpora barreras técnicas complejas para impedir que los desechos radiactivos entren en contacto con las aguas subterráneas. (Foto: ANDRA.)

El pronóstico de la evolución en el tiempo del sistema de evacuación es un problema fundamental y esto es aplicable tanto a la geosfera como a la biosfera. En lo que hace al aislamiento físico, el proceso de más interés es por lo general la erosión. Esta erosión es inherentemente dependiente de los procesos tectónicos y del clima, que afecta a la hidrología y, por ende, a la geoquímica.

#### Barreras técnicas

Las barreras técnicas se definen como una característica fabricada o modificada por el hombre; puede ser parte del embalaje de los desechos y/o parte del repositorio. Las estructuras técnicas de un repositorio cumplen varias funciones que pueden diferir en su significación para los diferentes tipos de desechos y conceptos de repositorios.

La función principal de la matriz de los desechos es limitar la tasa de liberación de los radionucleidos contenidos a un valor fijado por su baja degradación. Cuando se requiere estabilidad durante largos períodos de tiempo, es preciso comprender mecánicamente la degradación de la matriz para apoyar enfoques de preparación de modelos más empíricos. Para los desechos de alto nivel, la matriz en el caso del combustible gastado que se ha evacuado es por lo general el propio dióxido de uranio; para los desechos provenientes de la reelaboración es por lo general el vidrio de borosilicato, aunque se están estudiando también otras formas alternativas de desechos, por ejemplo el Synroc

\* *Final Storage of Spent Nuclear Fuel — KBS 3, 4* Volúmenes, Swedish Nuclear Supply Co. SKBF/KBS Suecia (1983).



y los productos cerámicos. El cemento y el asfalto se utilizan a menudo como matrices para los desechos de actividad intermedia. En el caso de los desechos de actividad baja por lo general no se necesita ninguna matriz.

El contenedor es un medio de proporcionar aislamiento completo de la matriz de desecho por un cierto período de tiempo. El tiempo durante el cual se puede mantener la integridad del contenedor varía según el tipo de desecho, las características del emplazamiento y la legislación de cada país. En los Estados Unidos, por ejemplo, se requiere para los desechos de actividad alta un tiempo de aislamiento mínimo de 1000 años. El estudio sueco KBS-3 indica períodos de aislamiento de hasta un millón de años para un bidón de cobre. Los requisitos para los desechos de actividad baja e intermedia no son tan estrictos. La finalidad principal del contenedor en este caso suele ser impedir la contaminación, facilitar la manipulación del desecho y actuar como blindaje de la radiación durante el almacenamiento. Por lo general, para los desechos de actividad alta se seleccionan normalmente metales como materiales para los contenedores, en atención al requisito de la resistencia mecánica. Generalmente se usan tambores de metal estándar para los desechos de actividad baja, así como para los de actividad intermedia, aunque para esta última categoría se utilizan también contenedores de hormigón.

La finalidad de una barrera de flujos es asegurar que las aguas subterráneas fluyen sobre todo alrededor de las barreras técnicas del repositorio, y no a través de las mismas. Esto ocurre cuando el campo cercano tiene una permeabilidad más baja que la de la roca hospedante. En la práctica, esto puede obtenerse utilizando un relleno de permeabilidad baja, por ejemplo la betonita y cementos especiales. En muchos casos, la barrera del flujo tendrá también la función adicional de retardar el transporte de los radionucleidos desprendidos de la matriz de desechos por lixiviación, actuando como un medio geoquímico de complejión.

En el caso de los desechos emisores de calor, es importante asegurar que las barreras técnicas se diseñen de modo que no se alcancen en el repositorio ni en los alrededores temperaturas inaceptablemente elevadas.

Un factor que ha sido objeto de creciente atención en los últimos años es el de las consecuencias potenciales de la formación de gases en un repositorio de desechos y su influencia sobre el comportamiento de las barreras técnicas.

Dado que el sistema completo de barreras técnicas consiste en un cierto número de componentes, algunos de los cuales cumplen varias funciones, la interacción entre las diferentes barreras debe ser evaluada. En el caso de los repositorios profundos, las interfases, particularmente entre las estructuras técnicas y la roca hospedante, son de particular preocupación en el relleno y el sellado, ya que durante la clausura definitiva del repositorio es preciso llenar y sellar una variedad de aperturas, incluidos túneles, pozos y perforaciones.

### Conceptos de diseño de repositorios

Se cuenta ya con considerable experiencia en la evacuación en tierra a poca profundidad de desechos de actividad baja. Muchas instalaciones de este tipo funcio-

nan ya, por ejemplo, en el Canadá, en Francia, en el Reino Unido y en los Estados Unidos, y la técnica para la evacuación en tierra a poca profundidad está bien probada. Las instalaciones existentes varían en su diseño, según las circunstancias locales, tales como el embalaje de los desechos y las características del emplazamiento. Algunas veces, como en el emplazamiento de evacuación francés de La Manche (La Hague), se utilizan complejas instalaciones técnicas para impedir el contacto con las aguas subterráneas. En otros casos, como en los Estados Unidos, se aprovecha el clima árido del emplazamiento que permite utilizar fosas sencillas y técnicas de relleno. En la actualidad, la tendencia es hacia la construcción de instalaciones mucho mejor diseñadas que hasta el presente. Asimismo, las autoridades que otorgan la licencia exigen normalmente un minucioso análisis de la seguridad, que debe ser aprobado antes de que se permita la entrada en funcionamiento de un repositorio poco profundo.

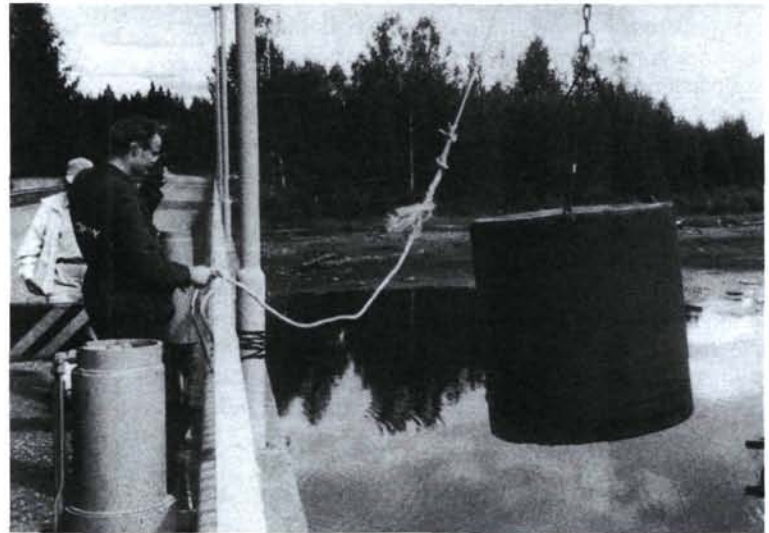
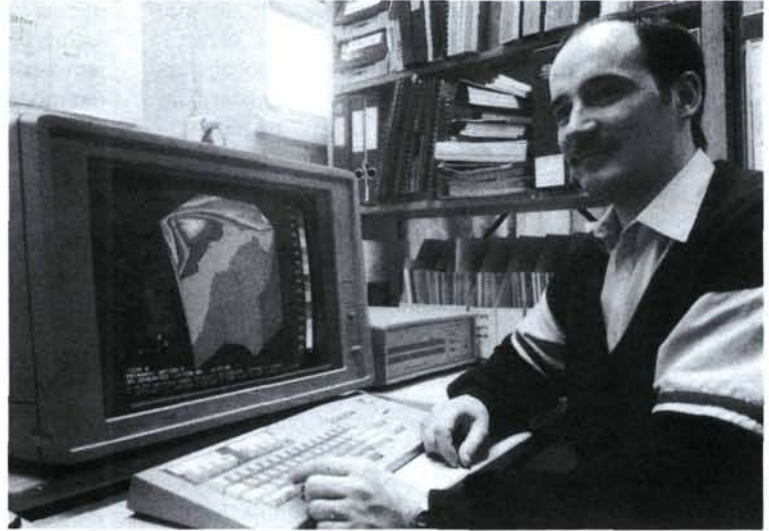
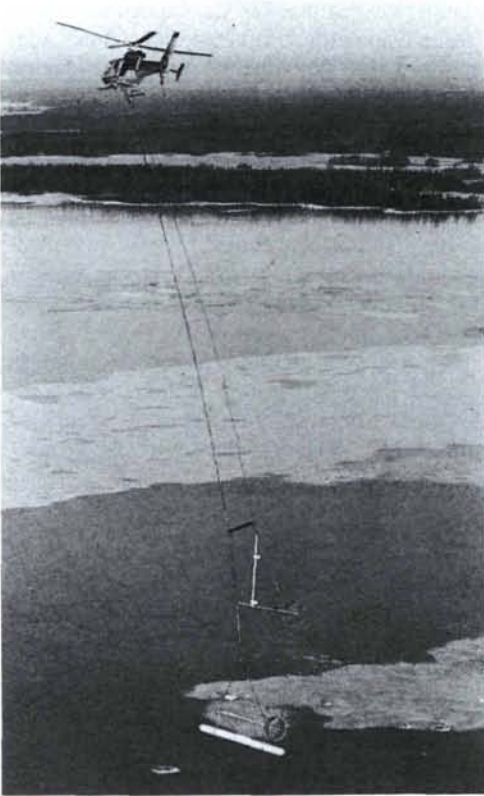
Hasta hace poco, la práctica más difundida había sido la evacuación cerca de la superficie para los desechos radiactivos de actividad baja. Esta técnica comprende ahora ciertas alternativas, tales como búnkeres de hormigón cubiertos de tierra, bóvedas subterráneas y cavidades de las actividades de minería. Un ejemplo de repositorio para desechos de actividad baja e intermedia en una cueva de roca proveniente de actividades de minería es el repositorio sueco SFR, que entró en funcionamiento en 1988. Otro ejemplo es la instalación Konrad de la República Federal de Alemania, que está casi terminada pero cuya entrada en funcionamiento todavía no ha sido aprobada. La instalación Konrad emplea para la evacuación una mina de hierro en desuso básicamente agotada.

Se reconoce en general que el grado necesario de aislamiento a largo plazo para los desechos que contienen grandes cantidades de radionucleidos de vida larga solo puede obtenerse en repositorios geológicos profundos. En varios países se han iniciado programas para el desarrollo de sistemas geológicos profundos para la evacuación de desechos de actividad alta. Se han desarrollado diseños conceptuales como parte del programa de desarrollo. Si bien los diseños son y deben ser específicos del emplazamiento y de la roca hospedante, todos se basan en el concepto de las barreras múltiples —naturales y técnicas— para asegurar la contención y el aislamiento necesarios.

Aunque hasta el momento no hay ningún repositorio de desechos de actividad alta en funcionamiento, dado que la instalación WIPP de los Estados Unidos todavía aguarda el permiso de explotación, existen en muchos países planes avanzados. Como ejemplos se pueden citar los estudios de construcción para el emplazamiento alemán de Gorleben, los diseños para el estudio sueco KBS-3 y los diseños para el estudio suizo del Proyecto Gewähr.\*

\* "Site investigations and conceptual designs for the repository in the nuclear 'Entsorgungszentrum' of the FRG", Röthemeyer, H., IAEA-SM-243, Vol. 1 (1980) 297-30. Asimismo, *Project Gewähr*, 8 vols., NAGRA NGB-89-09, NAGRA, Baden (Suiza) (1985).





En Finlandia se han realizado extensas investigaciones para la evacuación de desechos nucleares. Como parte de los estudios de investigación de emplazamientos, se realizó un reconocimiento geofísico desde el aire. Se utilizan códigos de computadora para estudiar los movimientos de las aguas subterráneas. Además, se sumergieron en un río contenedores de desechos de hormigón a escala normal durante cinco años para estudiar sus propiedades. (Fotos: YJT, Finlandia.)

### Evaluación del comportamiento de un sistema de evacuación

Una de las esferas más importantes de investigación y desarrollo relacionadas con la gestión de desechos radiactivos es el análisis de los impactos ambientales y la evaluación del comportamiento de los sistemas de evacuación de desechos radiactivos. Los enfoques de estas tareas son diversos pero todos tienen un objetivo en común: extraer información pertinente de estudios de campo y de laboratorio a fin de evaluar el comportamiento de una instalación de evacuación en relación con criterios de seguridad y aceptabilidad. Estos criterios están siendo elaborados y perfeccionados por las autoridades nacionales e internacionales pertinentes.

Se reconoce que el comportamiento a largo plazo de una instalación de evacuación no puede ser demostrado directamente, ya que se trata de períodos de tiempo que abarcan miles o a veces decenas de miles de años. Hay que utilizar métodos indirectos, empleando el análisis de pronóstico basado en un conocimiento detallado de las disposiciones de evacuación y de los procesos que actúan sobre la estructura.

Muchos países están haciendo grandes esfuerzos por desarrollar métodos para la evaluación del comportamiento de repositorios en largos períodos de tiempo. El análisis de la seguridad de los repositorios de desechos requiere el desarrollo de modelos que puedan describir sistemas de evacuación reales y cuantificar los procesos que ocurren en ellos. A fin de obtener la capacidad de pronóstico requerida para tales análisis, es esencial obtener un conocimiento meticuloso de los procesos involucrados, caracterizar plenamente el sistema que se ha de representar en el modelo y establecer una base de datos completa.

Con respecto al análisis del comportamiento de la biosfera, se comprenden bien las pautas actuales del transporte de radionucleidos en la biosfera en períodos de tiempo relativamente cortos. Los principales problemas se plantean, sin embargo, en cuanto a la evolución de la biosfera en el futuro más lejano y los posibles cambios de los hábitos humanos de alimentación y estilo de vida.

En general, las técnicas para los análisis de seguridad pueden dividirse en dos grandes grupos: análisis probabilistas y análisis deterministas. Un suceso puede tener



cierta probabilidad de ocurrir en un período de tiempo determinado, o el suceso habrá de ocurrir con certeza dentro del mismo período. Es importante reconocer que los análisis probabilistas y los análisis deterministas son técnicas complementarias y que ambas deben ser utilizadas en un análisis de la seguridad amplio.

La evaluación de la seguridad tiene por objeto demostrar el cumplimiento de los objetivos de comportamiento, a menudo expresados como criterios de aceptabilidad. Las evaluaciones son de dos tipos generales: genéricas y específicas de un emplazamiento; ambos tipos de evaluaciones se realizan por lo general en forma iterativa, hasta que se comprende plenamente el sistema y pueden extraerse conclusiones.

Las evaluaciones genéricas son útiles para adoptar decisiones relativas a un concepto o elección entre conceptos. También son útiles para obtener la aceptación de las autoridades y del público en general para el propio concepto de la evacuación geológica. Las evaluaciones específicas de un emplazamiento son una parte integrante del proceso de adopción de decisiones durante la elección del emplazamiento, el diseño, la construcción, la explotación, la clausura y el sellado de una instalación de evacuación de desechos radiactivos.

La técnica generalmente aplicada en la evaluación del comportamiento consiste en preparar modelos matemáticos, que representen los procesos físicos y químicos de importancia para predecir el comportamiento del repositorio durante largos períodos de tiempo. Se plantea entonces la cuestión de determinar en qué medida puede el modelo describir bien los sucesos reales. El proceso que consiste en comparar los resultados de los análisis predictivos (de modelos) con las observaciones y mediciones de campo y de laboratorio se denomina general-

mente validación. La realización de experimentos de campo y de laboratorio cuidadosamente diseñados y adecuadamente realizados es fundamental para la validación de modelos. También los análogos naturales, tales como los análisis de depósitos de minerales de uranio, se pueden utilizar con fines de validación. Ahora bien, en el marco de una confirmación completa del comportamiento futuro de una instalación de evacuación nunca se podrá lograr una "validación plena". Varias organizaciones, por ejemplo, la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE), la Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) y el Inspectorado Sueco de Energía Nucleoeléctrica (INTRAVAL), están efectuando estudios internacionales en la esfera del análisis de la seguridad y la evaluación del comportamiento.\*

### Aspectos institucionales

La evacuación de desechos radiactivos comprende un número de cuestiones que deben ser resueltas mediante un proceso razonado de adopción de decisiones. La mayoría de los países que tienen programas de evacuación de desechos regulan estos programas mediante otorgamiento de licencias a través de un órgano cuya finalidad es examinar, certificar y asegurar todas las etapas del programa de evacuación. El órgano regulador puede ser una única autoridad nacional o bien un sistema de autoridades designadas por el Gobierno. La parte fundamental de esos reglamentos es un conjunto de

\* *Safety assessment of radioactive waste repositories*, Actas del Simposio CCE/OIEA/AEN, París (Francia), 9 a 13 de octubre de 1989 (que será publicado por la AEN).



En varios países, las investigaciones relacionadas con los desechos nucleares se realizan en instalaciones subterráneas, tales como la instalación de Mol, en Bélgica. (Foto: UNIPEDE.)



procedimientos para las actividades de la organización ejecutora, el examen por el órgano reglamentador y la participación de otras partes.

En algunos países, por ejemplo en los Estados Unidos, el Gobierno puede encargarse tanto de las funciones de ejecución como de las de reglamentación. No obstante, también en esos países las funciones de ejecución de la evacuación de desechos están, por regla general, efectivamente separadas de las funciones de reglamentación.

Varios países con programas nucleoelectrónicos, por ejemplo, Finlandia, Suecia y los Estados Unidos, exigen que las compañías que producen energía reserven fondos para financiar la evacuación de desechos. De ordinario, pagan una cantidad basada en los kilovatios-hora producidos. Las sumas así reunidas se utilizan por lo general para actividades de investigación y desarrollo en la esfera de la evacuación de desechos y son también suficientes para financiar la construcción y el funcionamiento de las instalaciones de evacuación necesarias. En algunos países, como en el caso de Suecia, los fondos abarcan también la clausura de instalaciones nucleares y la evacuación de los desechos de la clausura.

Parece que a medida que transcurre el tiempo es más difícil obtener la aceptación por el público de las instalaciones nucleares, incluidas las de evacuación de desechos. La palabra clave parece ser información. Cómo informar al público sobre cuestiones de seguridad en el campo nuclear es una cuestión que hoy día despierta considerable interés, tanto entre los productores de energía nuclear, como entre los políticos y las autoridades encargadas de la seguridad. El OIEA ha dedicado mucho tiempo y ha organizado varios simposios dedicados a los diversos aspectos de la aceptación por el público. Una dificultad consiste en que lo que para un país es una solución con frecuencia no es aplicable directamente a otro país.

A lo largo de los años, se ha ido creando una intensa cooperación internacional en la esfera de la gestión de los desechos radiactivos. En esta cooperación participan no solo órganos internacionales, tales como el OIEA, la AEN/OCDE, la CCE, la CIPR y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), sino también otras instituciones bilaterales o multilate-

rales. Esta cooperación ha revestido suma importancia y los resultados de esta labor de colaboración están siendo utilizados por todas las organizaciones que se ocupan de la evacuación de desechos.

### Observaciones finales

La futura evolución de la energía nuclear depende de la capacidad para manipular y evacuar desechos radiactivos en forma segura y aceptable.

Parece que se tiene ya dominio de los medios de evacuación de desechos de actividad baja e intermedia. Es necesario encontrar soluciones específicas para cada emplazamiento, pero no debiera tropezarse con dificultades mayores, salvo quizá en lo que hace al consentimiento del público.

La situación de los desechos de actividad alta es algo diferente. La técnica para su evacuación existe, pero los métodos para garantizar la seguridad todavía deben ser perfeccionados. También esta cuestión está estrechamente relacionada con la aceptación por el público. Esto ha hecho que las autoridades encargadas de la seguridad requieran una considerable base de datos y un minucioso análisis de la seguridad para cualquier repositorio propuesto.

En vista de las sustanciales actividades de investigación y desarrollo que se realizan mediante mediciones de campo —por ejemplo, en los laboratorios subterráneos de Canadá, Suecia y Suiza, complementados con trabajos de laboratorio en química y geoquímica, y la labor teórica de preparación de modelos matemáticos— no hay razón para que haya demoras en el diseño, la construcción y la explotación de repositorios para desechos de actividad alta. Aparentemente, no habrá en Europa ningún repositorio de desechos de actividad alta en funcionamiento antes del año 2000. En los Estados Unidos, los planes prevén una instalación de evacuación para desechos de actividad alta alrededor del año 2000. Cabe recordar, no obstante, que la pronta evacuación de desechos de actividad alta no es una necesidad técnica ni radiológica: la experiencia ha demostrado que estos desechos pueden ser almacenados en forma segura por muchas décadas en instalaciones técnicas de superficie.

