

La Conferencia sobre la gestión de desechos radiactivos

por S. Fareeduddin y J. Hirling*

La energía nuclear se ha venido utilizando en escala industrial para la producción de electricidad durante casi 30 años. Se puede decir, por lo tanto, que esta industria ha llegado a la madurez. En el pasado se había logrado resolver adecuadamente los problemas relacionados con la gestión de desechos radiactivos, pero en vista de la creciente preocupación por la seguridad a largo plazo y la protección del medio ambiente, esos problemas se agudizan cada vez más en la puja por lograr la aceptación definitiva de la energía nucleoelectrica como una fuente de energía industrial a escala global.

Por lo tanto, se consideró oportuno organizar a principios del año en curso una conferencia internacional para examinar toda la gama de cuestiones relacionadas con la gestión de desechos radiactivos, así como sus repercusiones sobre los programas nacionales de energía nuclear. La conferencia tuvo lugar en Seattle (Washington), del 16 al 20 de mayo. La respuesta fue sumamente satisfactoria, lo cual refleja un interés mundial por este asunto: asistieron 528 participantes procedentes de 29 Estados Miembros del OIEA y ocho organizaciones internacionales. Se celebraron 21 sesiones, en el curso de las cuales se presentaron 149 memorias, incluido un informe sobre los propios trabajos del OIEA en esta esfera. Se celebró una sesión más para dos grupos de expertos, uno sobre las perspectivas de una mayor colaboración internacional y el otro para resumir los resultados de todas las sesiones técnicas.

El programa de la conferencia se organizó de modo que se pudiera pasar revista a cinco cuestiones principales y presentar información actualizada sobre ellas:

- la política de gestión de desechos y su aplicación: enfoques nacionales y multinacionales; aspectos jurídicos, económicos, ambientales y sociales (cuatro sesiones; 27 memorias de 16 países y cuatro organizaciones internacionales);
- manipulación, tratamiento y acondicionamiento de desechos de instalaciones nucleares, centrales nucleares y plantas de reelaboración, incluidos la manipulación y el tratamiento de desechos gaseosos y de desechos de tipos específicos (cinco sesiones; 35 memorias);

* El Sr. Fareeduddin es Director de la División del Ciclo del Combustible Nuclear del OIEA, y Presidente del Comité Directivo de la Conferencia internacional sobre gestión de desechos radiactivos. El Sr. Hirling es Jefe de la Sección de Gestión de Desechos de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y actuó como Coordinador Científico de la Conferencia.

- almacenamiento y evacuación subterránea de desechos radiactivos: generalidades, conceptos nacionales, laboratorios subterráneos y diseños de repositorios de desechos de actividad alta, baja e intermedia (cinco sesiones; 35 memorias);
- evaluación ambiental y de la seguridad en relación con los sistemas de gestión de desechos: metas, metodologías, evaluación de repositorios geológicos, desechos radiactivos de actividad baja e intermedia y colas de fabricación (cuatro sesiones; 26 memorias); y
- descargas radiactivas al medio ambiente procedentes de actividades nucleares: situación actual y perspectivas, procesos de transporte ambiental y control de la evacuación de desechos radiactivos en el medio ambiente (tres sesiones; 23 memorias).

Las memorias presentadas fueron seleccionadas de entre aproximadamente 500 contribuciones. La Secretaría Científica hizo cuanto estuvo a su alcance para que se discutieran los numerosos estudios recientemente emprendidos por el Organismo y por otras organizaciones internacionales en esferas concretas de la gestión de desechos, así como la situación actual de la política de gestión de desechos y su aplicación en países que utilizan la energía nucleoelectrica. Además, se consideró apropiado incluir estudios sobre la labor desarrollada en materia de evacuación subterránea de desechos por los países más adelantados en el campo de la energía nuclear, sobre el tratamiento y el acondicionamiento de combustible irradiado y desechos de reelaboración, y sobre la gestión de las colas de fabricación del uranio; se trató también de dar cierta perspectiva a los problemas de la gestión de desechos radiactivos, en comparación con otras consecuencias radiológicas de la industria nuclear, y a las cuestiones relacionadas con la gestión de desechos químicos. Unas 70 de las memorias presentadas fueron memorias solicitadas.

Hicieron uso de la palabra en la sesión de apertura de la conferencia el Director General del OIEA, Dr. Hans Blix, y los representantes del Gobierno de los Estados Unidos y del Estado de Washington. En su alocución, el Sr. M.J. Lawrence, Director Adjunto de la Nuclear Waste Policy Act Project Office del Departamento de Energía de los Estados Unidos, dijo que esta conferencia era "especialmente apropiada y oportuna" ya que su tema era "un desafío al que la comunidad internacional debe hacer frente satisfactoriamente si se ha de asegurar la opción de la energía nuclear para todos", y "una cuestión respecto de la cual nuestro

propio interés común por tener un medio ambiente global aceptable exige una estrecha cooperación”.

Dieron el tono a la conferencia los dos discursos de fondo sobre el estado actual de la tecnología de la gestión de desechos, y sobre las principales tendencias de las actividades de investigación y desarrollo en lo que se refiere a la aplicación de programas de gestión de desechos. El primer orador fue el Sr. J.A. Liebermann, destacado pionero de la gestión de desechos en los Estados Unidos desde los años 50, quien concluyó diciendo que está a nuestro alcance la tecnología para emplazar, diseñar, construir y administrar sistemas de gestión de desechos que satisfagan los rigurosos requisitos de la protección contra las radiaciones a costes aceptables, y que no se necesitan grandes descubrimientos tecnológicos. El segundo orador fue el Sr. J.F. Lefèvre, Director del Departamento de Desechos y Efluentes del Commissariat à l'énergie atomique, de Francia. Ambos oradores evocaron la larga experiencia en investigaciones relativas a la gestión de desechos radiactivos que hoy día forman una sólida base para la aplicación de sistemas industriales y proyectos específicos.

El Organismo presentó un informe sobre los objetivos, actividades y resultados de su propio programa de gestión de desechos, haciendo hincapié en recientes adelantos y en la colaboración con otras organizaciones internacionales en esferas pertinentes. Se puso de relieve la labor sistemática y general que ya se había realizado o que se estaba realizando a nivel internacional para prestar asistencia en la aplicación de programas nacionales de gestión de desechos y para resolver cuestiones internacionales afines.

La política de gestión de desechos y su aplicación

Las 27 memorias presentadas por 16 países y cuatro organizaciones internacionales respecto de este tema muestran que los Gobiernos tienen conciencia de que es necesario aplicar oportuna y adecuadamente sistemas de gestión de desechos radiactivos, incluyendo la definición de las disposiciones reglamentarias, institucionales y financieras conexas. En muchos países ya se han tomado decisiones en materia de políticas. La gama varía entre los países que proyectan ampliar sus programas nucleares en los próximos años (tales como Egipto) y aquellos cuya política nuclear actual prevé la utilización de la energía nucleoelectrica solo durante unos 30 años a contar de la fecha (Suecia). Muchos países disponen de programas que prescriben calendarios para la utilización de repositorios geológicos para desechos radiactivos de alta actividad o combustibles irradiados (Estados Unidos de América), o para la selección de los emplazamientos apropiados (por ejemplo, Argentina, la República Federal de Alemania, Suecia, Suiza), aunque existen algunos cuya política —en efecto— consiste en aplazar, como parte de una estrategia global de gestión de desechos, las decisiones sobre la construcción de dichos repositorios (Reino Unido).

Salta a la vista que existen ciertos fundamentos comunes bien definidos. Se percibe que la inspiración básica de las decisiones de política radica en la necesidad de asegurar la protección de la salud humana. En un gran número de países ya existe, o se está considerando, un marco jurídico, reglamentario, institucional,

financiero y administrativo bien definido para la aplicación de políticas. Se reconoce en general, caso con consenso, que la tecnología adecuada para la gestión segura de los desechos radiactivos se encuentra al alcance de la mano.

En muchos países se han establecido ya instalaciones subterráneas para la evacuación de desechos de actividad baja e intermedia (por ejemplo, en Francia, la India, la República Democrática Alemana, la Unión Soviética, el Reino Unido y los Estados Unidos de América). En estos y otros países se elaboran conceptos nacionales de evacuación que responden a las necesidades a largo plazo de los programas nucleares en marcha. Se manifiesta una tendencia general favorable a los métodos de evacuación en tierra firme, en lugar del vertido en alta mar de los desechos nucleares, a pesar de que este último continúa siendo de interés en algunos países (el Reino Unido, Japón, Bélgica, los Países Bajos y Suiza).

Las cuestiones de carácter sociopolítico relacionadas con la gestión de desechos, que en general se reconocen como causantes de problemas para el futuro crecimiento de la energía nuclear, constituyen un tema razonablemente común, aunque tal vez no universal, de discusión y resolución. Si bien a fin de lograr la comprensión y la aceptación del público, es necesario situar los riesgos de la gestión de desechos radiactivos en una perspectiva adecuada, el logro de dicho objetivo es una tarea difícil que requiere atención a nivel nacional e internacional.

La información con que se cuenta sobre las consecuencias económicas de la gestión de desechos indica que la inclusión del coste completo del almacenamiento y evacuación definitiva del combustible irradiado aumentaría la participación proporcional de éstos en el coste total de la energía nucleoelectrica (se han mencionado cifras superiores al 10%). El coste de la gestión de desechos se carga principalmente al precio de la electricidad, y ya se encuentran en vigencia, o entrarán en vigor próximamente, reglamentos que permiten tal procedimiento en Suecia (2,3 mills* por kWh), los Estados Unidos de América (1 mill por kWh), la República Federal de Alemania (6 mill por kWh), Suiza (5%), etc. Si bien dichos costes son superiores a lo que se había supuesto anteriormente, no parece que puedan tener consecuencias graves o decisivas con respecto al uso de la energía nucleoelectrica, ni siquiera en países con programas nucleares pequeños. El aspecto económico no es, ni será, un factor principal para que se simplifique o reduzca el conservadurismo de los sistemas de gestión de desechos radiactivos; los sistemas complejos destinados a satisfacer la seguridad a largo plazo y los requisitos estrictos de la protección radiológica pueden costearse aunque no siempre se justifiquen desde un punto de vista técnico.

Algunos países han creado instituciones especiales para aplicar o explotar sistemas de evacuación de desechos o de gestión de combustible irradiado, que las compañías de electricidad no puedan aplicar adecuadamente por sus propios medios: por ejemplo, ONDRAF en Bélgica, ANDRA en Francia, el SKBF en Suecia, la NAGRA en

* 1 mill = 10^{-3} dólares de los Estados Unidos = 0,1 centavo de dólar.

Suiza, y el NIREX en el Reino Unido. En los Estados Unidos de América, el Departamento de Energía, al poner en práctica las disposiciones de la ley sobre la política de los desechos nucleares, firmada por el Presidente Reagan en enero de 1983, creó una nueva oficina encargada de la gestión de los desechos radiactivos civiles, del desarrollo de instalaciones de almacenamiento temporal y de repositorios para el almacenamiento y la evacuación de desechos radiactivos de alta actividad y combustible nuclear irradiado, así como del establecimiento de un programa de investigación, desarrollo y demostración para éstos y otros fines.

De manera general se reconoció el papel positivo que desempeñan las organizaciones internacionales, si bien se consideró comprensible que los enfoques tiendan a ser tanto más generales cuanto mayor sea el número de miembros de un organismo. El mérito del OIEA como fuente de información y de orientación es evidente. En más de una ocasión han sido objeto de discusión las empresas organizadas a nivel de cooperación internacional en materia de evacuación de desechos, y en particular el deseo de los países más pequeños de tener acceso a repositorios en países más importantes del punto de vista nuclear, o de tener la posibilidad de transferir el combustible irradiado, aunque se reconoce que las actividades operacionales en este aspecto son prematuras.

Manipulación, tratamiento y acondicionamiento de desechos

Las 35 memorias presentadas en esta serie de sesiones examinaron las técnicas y la experiencia referentes a la manipulación, tratamiento y acondicionamiento de desechos de actividad alta, intermedia y baja procedentes de la explotación de centrales nucleares y plantas de reelaboración, de las operaciones de clausura y de algunas otras instalaciones nucleares, comprendidas las relacionadas con los ciclos avanzados del combustible nuclear.

Las encuestas, que se basaron principalmente en estudios recientes realizados por grupos de expertos internacionales, indicaron que las técnicas para la manipulación de desechos de actividad intermedia y baja eran resultado de la experiencia industrial —aunque ello no disminuía la necesidad de nuevos adelantos tecnológicos. En países de las Comunidades Europeas se ha iniciado un notable esfuerzo para caracterizar las propiedades de los desechos de actividad intermedia y baja, con objeto de obtener el nivel requerido de garantía de calidad con respecto a las formas y los embalajes de los desechos para su almacenamiento y evacuación, así como para crear un banco de datos. Asimismo, los resultados obtenidos por el programa de investigaciones coordinadas del OIEA sobre la evaluación de formas acondicionadas de desechos de alta actividad demuestran la importancia de los métodos de investigación comunes y de la evaluación del comportamiento de diversas formas de desechos en condiciones "reales" de repositorio.

En unos cuantos países se encuentran en construcción o sometidas a ensayos activos un cierto número de plantas piloto o plantas prototipo para la vitrificación de desechos de alta actividad. Hasta ahora, únicamente



En una exposición instalada en el recinto de la conferencia, en Seattle, se describieron algunos de los trabajos del Organismo en la esfera de la gestión de desechos radiactivos. En la fotografía, dos participantes examinan una de las muestras.

en Francia se ha obtenido experiencia a nivel industrial con casos reales de vitrificación de desechos de alta actividad. Una memoria sobre el tratamiento de desechos especiales de la Unidad 2 de Three Mile Island destaca la diversidad de los problemas que pueden plantearse cuando se deben adoptar medidas de descontaminación y de remedio después de accidentes que afectan a instalaciones nucleares. Un examen internacional sobre la clausura de instalaciones nucleares indica que el acervo de experiencia y capacidades en técnicas y planificación es adecuado para hacer cálculos de costes fiables, y para aplicar medidas apropiadas para la eliminación definitiva de desechos procedentes de clausuras.

Una memoria sobre la gestión de desechos resultantes de las centrales nucleares trató de las técnicas de compactación, incineración, embetunado y cementación, y de problemas concretos relacionados con la manipulación de resinas de intercambio iónico agotadas y desechos portadores de tritio. Se destacó la importancia de que se continúen mejorando las técnicas encaminadas a la reducción volumétrica, especialmente para facilitar el almacenamiento provisional: la República Federal de Alemania, por ejemplo, procura reducir el volumen de los desechos de las centrales nucleoelectricas por un factor de cinco.

El problema más importante de la gestión de desechos gaseosos es la recuperación y el almacenamiento de cantidades importantes de cuatro radionucleidos —el criptón-85, el yodo-129, el tritio y el carbono-14— resultantes de la disolución de combustible en las plantas de reelaboración. El escape de cualquiera de dichos radionucleidos puede aportar aumentos en la dosis comprometida de los habitantes, tanto de las regiones vecinas a las centrales como en todo el mundo. La gestión de los contaminantes suspendidos en el aire es una empresa compleja debido a que su recuperación, inmovilización y almacenamiento exige tecnologías diferentes para cada uno de dichos elementos. La recuperación y el almacenamiento del yodo-129 y, en una medida algo menor, la del carbono-14 y del criptón-85 parecen estar justificados. Ninguno de los criterios evaluados puede servir de base para respaldar la decisión de controlar las emisiones de tritio, y, por lo tanto, no se recomendó la recuperación de este elemento.

En una memoria de la CCE se expuso un concepto global de las actividades de investigación y desarrollo en la gestión de desechos radiactivos procedentes de la clausura de centrales nucleoelectricas. Se encuentran en desarrollo técnicas de descontaminación sumamente eficaces, especialmente utilizando un descontaminante químico sumamente activo en forma de líquido o de gel. También se estaban considerando técnicas electroquímicas e hidroquímicas. Se han obtenido algunos resultados alentadores en la descontaminación de superficies de hormigón mediante la aplicación de calentamiento rápido, lo que causa el desprendimiento de una delgada capa superficial.

Autores de Francia, la República Federal de Alemania, India, Japón, el Reino Unido y los Estados Unidos de América presentaron la experiencia y los enfoques nacionales relativos a la gestión de todo tipo de desechos radiactivos de plantas de reelaboración. Los países citados han construido plantas de tratamiento eficaces que ya se utilizan en la industria o que se encuentran en la etapa de demostración; además, se ha recogido una experiencia de muchos años de operaciones industriales. Es corriente el empleo de técnicas tales como la evaporación, la coprecipitación, la incineración y la compactación, las medidas para recuperar plutonio, el embetunado y la cementación para el acondicionamiento de desechos de actividad intermedia y baja. Se presentaron exámenes panorámicos sobre proyectos y la experiencia adquirida en los Estados Unidos respecto del tratamiento y el acondicionamiento de la gran diversidad de desechos producidos por las plantas de reelaboración de Hanford, Idaho y Savannah River. También se presentó la experiencia adquirida en la planta de reelaboración francesa de La Hague, incluyendo las disposiciones adoptadas para las nuevas instalaciones que se construyan en dicho emplazamiento.

Se consagran considerables esfuerzos al tratamiento y acondicionamiento de los desechos almacenados en instalaciones del Departamento de Centrales Energéticas de los Estados Unidos, conforme a lo requerido por la ley de ese país, de 1983, referente a la política sobre los desechos nucleares. Se han desarrollado y se aplican técnicas para la separación del cesio-137, el estroncio-90,

el criptón-85 y el americio-241 de los desechos de alta actividad.

La experiencia comunicada por el Reino Unido en materia de plantas de reelaboración pone de relieve el hecho de que las cuestiones referentes a la gestión de desechos de actividad intermedia pueden llegar a tener más importancia que las de la gestión de desechos de alta actividad, para los cuales se construyen plantas de vitrificación. En la República Federal de Alemania, la Wiederaufbauarbeitenanlage Karlsruhe (WAK) ha realizado trabajos especiales para mejorar la recuperación del plutonio y el tratamiento de solventes orgánicos, así como para reducir el volumen de los desechos resultantes. Un programa en la India, donde se ha construido una planta de vitrificación, y plantas piloto de Italia se basan en tecnologías que son similares a las utilizadas en otros países.

Otras memorias dieron cuenta de la situación de las plantas piloto de vitrificación en Bélgica, la República Federal de Alemania, Italia, la Unión Soviética y los Estados Unidos de América (en la región de West Valley), en las que se almacenan los residuos procedentes de anteriores actividades de reelaboración comercial. Otros ejemplos de tecnologías mejoradas para el tratamiento de desechos de actividad baja e intermedia son los procesos de digestión por ácidos, para el tratamiento de desechos de combustibles portadores de emisores alfa —etapa preliminar en la recuperación de plutonio— y el proceso de incineración de escorias utilizado en Bélgica para el tratamiento integrado de materiales portadores de emisores alfa, beta y gamma. Este último proceso parecería ser particularmente prometedor para lograr grandes reducciones de volumen y formas de desechos estables. En Australia se sigue estudiando el proceso Synroc como una alternativa a la vitrificación de desechos de alta actividad; las investigaciones realizadas en ese marco comprenden la evaluación de la viabilidad industrial de ese proceso en plantas a escala piloto, así como investigaciones sobre otras composiciones de desecho-roca, incluidas aquellas que incorporan combustibles irradiados en solución.

Todas las presentaciones indicaron que la tecnología para la gestión de desechos de alta actividad y desechos portadores de emisores alfa en las instalaciones de reelaboración ha pasado fundamentalmente la etapa de investigación y desarrollo, y ahora se encuentra suficientemente adelantada para su aplicación a escala industrial en plantas en funcionamiento o en construcción en diversas partes del mundo. Como es lógico, se pueden esperar mejoras y existen igualmente ciertos aspectos que podrían requerir mayor estudio. Este es particularmente el caso en lo que respecta a la recuperación de nucleidos gaseosos tales como el criptón-85, el yodo-129, el carbono-14 y el tritio. La experiencia recogida hasta la fecha en Francia con desechos de reactores reproductores rápidos y su ciclo del combustible nuclear indica que la gestión de esos desechos es posible y que no se crearán problemas tecnológicos esencialmente nuevos.

Una conclusión general que se desprende de todos los trabajos presentados en esta serie de sesiones es que los medios técnicos para la gestión de desechos radiactivos

en las instalaciones nucleares son una realidad demostrada y al alcance de la mano. El hecho de que se prosiga su desarrollo no debe constituir un obstáculo para los programas nucleoelectrónicos actuales.

Almacenamiento y evacuación subterráneos de desechos radiactivos

Las 35 memorias presentadas en esta serie de sesiones tratan de la experiencia, la práctica real y los refinamientos respecto de las técnicas de evacuación subterránea de desechos de actividad baja e intermedia, así como del almacenamiento de combustibles irradiados y de desechos de alta actividad. El estado bien adelantado del desarrollo teórico y la preparación práctica de la evacuación definitiva de desechos de alta actividad y de combustibles irradiados se describió *in extenso*.

El aspecto común de todos los trabajos presentados consistió en la necesidad de contar con objetivos de protección radiológica aceptados en general para la evacuación subterránea de desechos radiactivos que permita derivar criterios para las diferentes opciones de eliminación de desechos. Las directrices que figuran en algunos de los informes recientes del OIEA —tales como la Colección Seguridad Núms. 54, 56 y 60, preparados como parte del programa de trabajo del Organismo en esta esfera— tendrían pertinencia en este contexto.

Respecto del combustible irradiado y los desechos vitrificados de alta actividad, cabe distinguir dos etapas: *almacenamiento interino* y *evacuación definitiva*. En dos memorias se examinaron la tecnología disponible en materia de almacenamiento y de manipulación. Dos décadas de experiencia en el almacenamiento de combustible irradiado permiten sacar conclusiones utilizables por varios decenios por venir, dando tiempo para determinar sin prisas el momento óptimo para la transición del almacenamiento a la evacuación definitiva. Con respecto a la evacuación definitiva de cualquiera de los dos elementos, combustible irradiado o desechos vitrificados de alta actividad, un cierto número de memorias indicaron la manera cómo se habían desarrollado los conceptos de los repositorios y como se habían efectuado los levantamientos de los emplazamientos, utilizando para la investigación métodos geofísicos, geoquímicos y de otra índole. Los resultados obtenidos con respecto a los diferentes tipos de roca tales como granito, sal, arcilla, basalto y toba indican claramente que los objetivos de protección radiológica se pueden lograr de diferentes maneras. Resultó de particular interés una memoria sueca que describe el concepto que consiste en evacuar el combustible irradiado embalado en repositorios de granito. El estudio llega a la conclusión de que el estado de la tecnología actual permite adquirir los conocimientos adecuados para formular predicciones a largo plazo, y que el sistema total de repositorios brindaría una protección muy superior a las necesidades de la sociedad de hoy día.

Se consagró una sesión completa a los laboratorios de rocas subterráneas y proyectos piloto en los que se han invertido ingentes recursos en Bélgica, Canadá, la República Federal de Alemania, Suecia (el proyecto Stripa), Suiza y los Estados Unidos de América. Como

es evidente, los proyectos piloto dependen en gran medida de los sistemas. Varían, en consecuencia, según el concepto de evacuación y el tipo de roca huésped: granito (Canadá, Suecia, Suiza, Estados Unidos de América), sal (República Federal de Alemania, Estados Unidos de América), arcilla (Bélgica), basalto (Estados Unidos de América), etc. Las presentaciones mostraron como se puede y se habrá de lograr el objetivo de establecer repositorios geológicos profundos. La metodología teórica utilizada es bastante similar en Argentina, Bélgica, Canadá, Francia, Suecia, Suiza y los Estados Unidos de América. En todos los casos, con una excepción, se proyectan los repositorios para que puedan aceptar desechos de alta actividad hasta bastante después del fin del siglo; la excepción es un repositorio de los Estados Unidos de América en basalto, toba o sal que debería habilitarse en 1998.

La situación es diferente en lo que se refiere a la evacuación de desechos de actividad media y baja, en capas poco profundas o en repositorios situados en cavidades rocosas. La evacuación a poca profundidad ha encontrado utilización práctica durante decenios; numerosas memorias presentaron compilaciones interesantes de la experiencia adquirida en Francia, la India y los Estados Unidos de América. En las primeras operaciones de evacuación, con frecuencia los embalajes no se proyectaban con miras a ofrecer una barrera de confinamiento que durase largo tiempo (por ejemplo, algunos contenedores eran de cartón). No obstante, mediciones de radionucleidos específicos realizadas en las aguas subterráneas correspondientes a la formación, durante períodos de muchos años, permitió sacar la conclusión de que en condiciones hidrológicas, topográficas y climáticas normales, las emanaciones se encontrarían dentro de límites bien aceptables.

Una memoria trató concretamente los problemas geohidrológicos encontrados en evacuaciones a poca profundidad en los Estados Unidos de América. A pesar de los problemas señalados, que resultaban de prácticas anteriores y actuales de evacuación, los autores se mostraron, sin embargo, optimistas, al declarar que ninguno de los problemas observados habían producido perjuicios humanos aparentes, que la experiencia adquirida en la investigación los problemas de la migración de radionucleidos había permitido una mejor comprensión de los requisitos de las ciencias de la tierra, y que cada uno de los problemas indicados se prestaba a soluciones prácticas mediante la apropiada selección del emplazamiento, el diseño y la explotación de los repositorios.

Varias memorias subrayaron los progresos realizados en el diseño de repositorios. Estos depósitos presentan formas que varían entre zanjas subterráneas sin revestimiento y montículos o monolitos por encima de la superficie. Los nuevos diseños del último tipo construidos en Francia disponen de un sistema propio de recolección de aguas que permite controlar la migración de radionucleidos al exterior del repositorio.

La utilización de cavidades en rocas de tipos diferentes, ya sean minas abandonadas o excavaciones especiales, parece adquirir mayor importancia en lo que se refiere a la evacuación de desechos de actividad

intermedia y baja. Algunos países tienen experiencia operacional en repositorios situados en cavidades rocosas (la República Federal de Alemania [minas abandonadas], la República Democrática Alemana y España), y otros proyectan construir repositorios de ese tipo en rocas duras (Finlandia, Suecia, Suiza y el Reino Unido).

Se pasó revista a las prácticas de gestión de las colas del tratamiento de uranio, haciéndose hincapié en los intentos recientes para reducir las consecuencias ambientales. Se realizan trabajos, con el apoyo de los Gobiernos, para mejorar la protección de las aguas subterráneas y reducir las emanaciones de radionucleidos de período largo que tienen importancia desde el punto de vista ambiental. Los países interesados en dichos problemas tienen plena conciencia de las consecuencias a largo plazo de las emanaciones de las colas de tratamiento y, por lo tanto, buscan métodos mejorados de contención y de gestión.

Objetivos y metodologías para las evaluaciones ambientales y de la seguridad

Se presentaron 26 memorias en las sesiones que trataron de las evaluaciones ambientales y de la seguridad de los sistemas de evacuación de desechos. Fueron objeto de considerable discusión los criterios básicos para la determinación de los objetivos, y hubo consenso sobre los requisitos de la limitación de dosis actual y futura. Los criterios de la Comisión Internacional de Protección Radiológica parecen haber sido bien aceptados. Se opinó que se podría utilizar como confín superior una fracción de las dosis límites para individuos. Se tropezó con dificultades en la discusión sobre las dosis que podrían resultar de la rotura de un repositorio, teniendo en cuenta que se trata de sucesos tanto de alta como de baja probabilidad.

Se discutieron en detalle los factores que es preciso tener presente en la optimización de la protección radiológica. Una parte interesante de esta discusión fue la aclaración de los problemas de la integración de las dosis *colectivas* en un futuro extremadamente remoto. Se hizo patente que la única parte pertinente de la dosis colectiva es la que es influenciada por la opción que se escoja, porque la parte sobrante se anula al sustraer una opción de otra. Esto haría que las evaluaciones relativas a períodos más cortos fueran más razonables que la integración en períodos geológicos. Otro aspecto interesante es que en la selección de opciones se debería considerar la parte de la dosis colectiva que es menos incierta, porque si se tomara el valor global con sus enormes incertidumbres, se perdería la determinación y la precisión en la selección entre una opción u otra. De estos dos factores, la parte influenciada por la elección de la opción y la parte que es menos cierta podrían determinar el período de integración en el futuro, que no puede ser infinito.

Hubo una discusión sobre las maneras de escoger entre varias opciones. Una de ellas es el análisis de coste-beneficio, que parece bastante transparente siempre que las decisiones más importantes se tomen de antemano respecto de algunos de los componentes. También se discutieron otros métodos tales como los

análisis de decisión, y tuvo lugar una considerable discusión sobre lo que es "razonable". Los encargados de las evaluaciones parecen mostrar preferencia por normas basadas únicamente en las dosis individuales futuras, con algún tipo de valor aceptable de incertidumbre y tal vez algún criterio en cuanto a la reducción de la dosis. Pero en general, los enfoques parecen ir adquiriendo cierta convergencia hacia la aplicación de una filosofía compleja de protección radiológica con respecto a la evaluación de las prácticas de gestión de desechos.

Algunas memorias se ocuparon concretamente de las evaluaciones de seguridad en relación con la evacuación de desechos de actividad intermedia y baja y de colas de tratamiento. En el caso de las colas de tratamiento se había procurado utilizar, o por lo menos destacar, lo que constituye los principios fundamentales de la optimización de las decisiones. Se expusieron también algunos análisis de medios tecnológicamente viables para reducir las emisiones de radón, y de evaluar su importancia real a largo plazo. Con respecto a los desechos de actividad intermedia y baja, la clave consiste probablemente en poder cuantificar lo que se entiende por "seguridad", y no únicamente en la evaluación para determinar si un sistema es "bueno" o "malo". También se han hecho algunos análisis de mecanismos "normales" de emanaciones transportadas por el agua, y comparaciones con criterios basados en dosis individuales. Asimismo, se caracterizó el suceso de ruptura más probable: por ejemplo, la perforación de la formación, y se evaluó el tiempo mínimo de vigilancia necesario para garantizar la conformidad con los objetivos fundamentales. Las discusiones sobre los repositorios en formaciones geológicas profundas trataron principalmente de la evaluación de la seguridad y del comportamiento. Entre las memorias también había algunas sobre la evaluación de la seguridad en repositorios "ideales" en diferentes tipos de rocas, y sobre evaluaciones con respecto a emplazamientos concretos. En todos los casos, se analizaron los comportamientos de los diferentes sistemas de barreras, comenzando con la disolución real de la matriz portadora de los desechos, el desplazamiento de los bultos, los materiales de separación y de contención y su comportamiento, y la migración a la biosfera a través del sistema rocoso, y concluyendo con una estimación de las dosis a la población resultantes.

El Sr. Thomas H. Pigford, Presidente de uno de los grupos de discusión, dio cuenta de un estudio sobre consecuencias ambientales, que formaba parte de un estudio más general sobre la evacuación de desechos en formaciones geológicas efectuado por el Grupo de expertos sobre Aislamiento de Desechos del National Research Council de los Estados Unidos. Los parámetros hidrológicos y geoquímicos de emplazamientos concretos, complementados, cuando fue necesario, con parámetros genéricos, permitieron calcular las futuras dosis de radiación para personas expuestas al máximo, con respecto a repositorios en formaciones de basalto, granito, sal y toba. Se compararon estos resultados con un criterio de rendimiento de 10^{-4} Sv · año⁻¹ para los casos de exposición a las radiaciones resultantes de sucesos "probables". Partiendo de los supuestos de este

estudio, se indicó que la dosis individual máxima calculada sería muy inferior al criterio de rendimiento. El estudio formuló también un cierto número de recomendaciones y conclusiones. Entre ellas figura la necesidad de un criterio general preciso para definir el rendimiento global aceptable de los sistemas de aislamiento de los desechos en formaciones geológicas; las directrices y enfoques que se deben tener en cuenta en las esferas técnicas y de otra índole; y los medios para reducir incertidumbres en la precisión de las previsiones de las emisiones futuras al medio ambiente.

Las memorias presentadas en estas sesiones indicaron el grado de perfeccionamiento adquirido por las evaluaciones de la seguridad. Tal vez el punto más importante es que gran parte de la información no es muy definida, y que, por consiguiente, los análisis de sensibilidad son extremadamente importantes, especialmente en la cuantificación del efecto de la incertidumbre sobre los diferentes parámetros físicos. Algunos parámetros físicos tienen un fuerte efecto en el resultado final, en tanto que otros no. Asimismo, es bastante diferente la forma en que se enfocan las incertidumbres. En el enfoque "determinístico", la incertidumbre se debería tener en cuenta al maximizar la dosis colectiva final a los efectos de comparación con algún tipo de objetivo. En el caso del enfoque "probabilístico" se requieren las mejores estimaciones en combinación con las probabilidades correspondientes.

Procesos y modelos de transporte ambiental

Las 23 memorias presentadas en las sesiones sobre procesos y modelos de transporte ambiental trataron del desarrollo de medios técnicos para evaluar las consecuencias de las emisiones al medio ambiente. En una memoria en la que se describía un modelo del transporte de radionucleidos de período largo liberados en el medio ambiente, se indicaban algunas de las deficiencias de los modelos sobre el transporte de tritio y yodo-129, especialmente cuando se necesita conocer las dosis cerca del punto de emisión. En otra memoria se presentó un informe preliminar de lo que en su debido tiempo será la intercomparación internacional más importante, el proyecto INTRACOIN. Este comprende la comparación de unos 20 códigos de computadora para establecer el modelo de transporte de radionucleidos en el campo geológico lejano; participan en el estudio grupos sobre modelos del Canadá, Dinamarca, Francia, Suecia, Suiza, el Reino Unido y los Estados Unidos de América.

Varias memorias relacionadas con investigaciones y mediciones pusieron de manifiesto la complejidad del medio ambiente y la sensibilidad del transporte de radionucleidos a las interacciones químicas y bioquímicas. En particular, el efecto de la movilidad de los nucleidos en asociación con agentes complejantes como el EDTA y otras especies orgánicas tales como los ácidos carboxílicos, son objeto de estudio en los Estados Unidos de América, en la instalación de Maxey Flats, para la eliminación de desechos de actividad baja.

Es manifiestamente necesario un mayor realismo en los modelos de predicción, en la medida en que el

interés pasa ahora a los estudios de emplazamientos concretos y se concentra más en la optimización de las instalaciones y los procedimientos para la evacuación de desechos. Por otra parte, si se pretende que los modelos simulen en detalle todas las complicadas interacciones en las condiciones reales del emplazamiento de evacuación, la tarea puede resultar frustrante. Es necesario encontrar el equilibrio adecuado.

La mayoría de las memorias de la sesión dedicada al control de la evacuación de desechos radiactivos en el medio ambiente marino trataron del vertido en el mar de desechos sólidos embalados. Actualmente se realizan considerables investigaciones coordinadas a nivel internacional en el marco de las diversas disciplinas necesarias para evaluar de nuevo el peligro del vertido en el mar y examinar nuevamente la definición de desechos de alta actividad formulada por el OIEA. Varias memorias describieron aspectos de estas investigaciones, que comprenden el examen de modelos oceanográficos recientemente terminados por un Grupo mixto de expertos de las Naciones Unidas sobre los aspectos científicos de la contaminación de las aguas del mar (GESAMP), las investigaciones coordinadas y el programa de vigilancia del medio ambiente creados por la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) y las mediciones experimentales que lleva a cabo el OIEA en el Laboratorio Internacional de Radiactividad Marina de Mónaco. El consenso de estas memorias es que en breve se dispondrá de modelos más adecuados y más realistas para aplicar las bases de datos mejoradas que se encuentran en preparación, a fin de realizar los diferentes estudios necesarios. Ninguna de las investigaciones efectuadas hasta la fecha indica que las evaluaciones de riesgos anteriores hayan resultado demasiado bajas. Más bien, se han identificado más procesos para retardar la transferencia de radionucleidos al ser humano. Este es un aspecto en el que claramente resulta esencial la colaboración científica internacional y en que el OIEA sigue cumpliendo un papel crucial y activo.

Dos memorias trataron de la posibilidad de eliminar desechos de alta actividad en fondos marinos. Los trabajos sobre esta cuestión se llevan a cabo bajo los auspicios del Grupo de trabajo sobre fondos marinos de la AEN, y en una de las memorias se describen el desarrollo, la organización actual y los programas de dicho Grupo. La evacuación en los fondos marinos es al parecer técnicamente viable, pero hay muchas cuestiones de carácter técnico e institucional que deben solucionarse antes de que se pueda considerar la aplicación de esta opción.

Con fines informativos, se pasó revista a la exposición pública resultante de escapes al mar de nucleidos transuránicos de la instalación Sellafield del Reino Unido (más conocida con el nombre de Windscale). La memoria del Reino Unido hacía hincapié en la conveniencia de aprovechar la experiencia de los programas de medición para evaluar la dosis y en la dificultad de prever de manera realista las dosis en el futuro a partir de tales radionucleidos de período largo.

En una memoria de los Estados Unidos se presentaron los resultados de un estudio *in situ* de nueve años sobre la migración de radionucleidos procedentes de la detonación subterránea a título de ensayo de un

dispositivo nuclear de baja potencia en una formación tubácea aluvional en el polígono de ensayos de Nevada, y se indicó que la mayor parte de la radiactividad se encontraba retenida en los desechos fundidos en la región de la cavidad. Se analizaron muestras obtenidas a diversas profundidades, desde subsuperficiales hasta 50 metros debajo del punto de detonación: se observó que en las muestras más profundas no existía actividad superior a la actividad de fondo, y que en el agua contenida en la cavidad solo había tritio y estroncio-90 a niveles superiores a las concentraciones recomendadas para el agua en áreas no controladas.

En otras diversas memorias presentadas en esta sesión, que trataron las emisiones al medio ambiente procedentes de la generación nucleoelectrónica, y se examinaron los niveles generales de la contaminación ambiental y de las dosis consiguientes. Un ejemplo de ello es un resumen del informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR). También se celebraron discusiones sobre los procedimientos para autorizar las descargas, y sobre la necesidad de considerar posibilidades más amplias de optimización, tales como comparar la retención, solidificación y evacuación con la descarga directa de ciertos nucleidos. Otro problema consiste en determinar el margen de acumulación en el medio ambiente que se puede tolerar y las dosis que se recibirán en un futuro remoto en puntos alejados del lugar de la descarga.

Una novedad internacional importante son los trabajos realizados en busca de un acuerdo sobre el control de la contaminación transfronteriza. La clave consiste en admitir que las dosis que reciben tanto los "extranjeros" como los nacionales del país que emite los radionucleidos, deberían tener un factor de ponderación igual. El OIEA desempeña un importante papel en este esfuerzo.

Una memoria de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sirvió para recordar que la magnitud de la preocupación, el conocimiento y la complejidad del enfoque que se aplica a la evacuación de desechos radiactivos es mucho mayor que la que se consagra a la de otros desechos tóxicos. No está claro qué trabajos prácticos se requieren para situar en su verdadera perspectiva al problema de la gestión de desechos radiactivos.

Perspectivas de cooperación internacional

Además de las presentaciones efectuadas por diversas organizaciones internacionales, y de los resultados de las panorámicas internacionales de cuestiones específicas realizadas durante las sesiones técnicas, un grupo compuesto de representantes de organizaciones internacionales afines y ciertos Estados Miembros discutieron las perspectivas de lograr una cooperación internacional más completa.

El Presidente de la compañía Swedish Nuclear Fuel Supply, Sr. E. Svenke, se refirió a lo que llamó la "amenaza tridimensional" de la energía nuclear: la "amenaza de las armas nucleares", la "amenaza de la radiación", y una "tercera dimensión" caracterizada

por el espacio de tiempo durante el cual los desechos radiactivos deben permanecer en aislamiento definitivo. El Presidente llegó a la conclusión de que la colaboración internacional es no solo valiosa sino indispensable en esta esfera a causa de la dimensión "moral" de los requisitos de seguridad a largo plazo. Sin poner en tela de juicio los límites y soberanías nacionales actuales, estas premisas conducen por lo menos a la necesidad de un consenso internacional sobre principios generales y métodos de evaluación. Se mencionó la posible utilidad de los repositorios multinacionales.

Los representantes de la CIPR, el OIEA, la OMS, la AEN, la CCE y el Consejo de Asistencia Económica Mutua (CAEN) describieron sus ámbitos de responsabilidad y actividades; y a continuación se consideró la experiencia obtenida por países tales como Francia, India, Suecia y los Estados Unidos de América en materia de cooperación internacional, y lo que estos países podían esperar de ella. Además de los incentivos generales para la cooperación internacional tales como el intercambio de experiencia, el logro de economías de escala o la mancomunación de los recursos, puede haber influencias importantes relativas a la armonización de los enfoques nacionales, o la justificación de sus diferencias, y la obtención de su aceptación sociopolítica y pública. Se mencionaron varias esferas en que la cooperación internacional podría ser importante, y hubo consenso en que el desarrollo de criterios de seguridad convenidos en el plano internacional, comprendidas metodologías y el aporte básico de datos para demostrar observancia con requisitos de seguridad a largo plazo, debería ser un objetivo fundamental a fin de demostrar que la evacuación segura de todo tipo de desechos radiactivos es posible y que se pueden evaluar y aceptar para su aplicación los diseños y proyectos correspondientes.

Las ventajas de la cooperación internacional son evidentes. Si se obtiene un amplio consenso internacional sobre los principios, así como sobre los métodos de evaluación de la seguridad y los datos aportados, se puede reforzar la confianza pública en que se están adoptando las medidas de seguridad adecuadas.

Se admitió igualmente que la comunidad nuclear necesitaba integrarse más decididamente en el seno de la sociedad en general, y se sugirió que el OIEA, en su carácter de organización internacional de reputación reconocida, podría tal vez explorar los medios de comunicarse objetivamente con otros grupos profesionales e interesados.

Conclusiones generales

El Sr. B.A. Semenov, Director General Adjunto del OIEA y Jefe del Departamento de Energía y Seguridad Nuclear, presidió el grupo de clausura. Cinco expertos que habían ejercido la presidencia de alguna de las sesiones técnicas presentaron los puntos sobresalientes que se habían planteado en el marco de cada una de las cinco cuestiones principales. Se sacaron las siguientes conclusiones generales.

1. Como se había previsto, la conferencia no puso de manifiesto ningún adelanto científico o tecnológico revolucionario, pero sí demostró que en la mayoría de

los países se iba perfilando la aplicación de sistemas para la gestión y evacuación de desechos radiactivos. En muchos países, esta evolución se reflejaba en decisiones de política, así como en disposiciones de carácter institucional y financiero.

2. La tecnología de la gestión de desechos había superado la etapa del desarrollo e iniciaba la etapa de la aplicación industrial en plena escala. Se repite a menudo que "se dispone de la tecnología" para poner en práctica sistemas adecuados de gestión de desechos que respondan a las necesidades de los programas nucleoelectrónicos y a los objetivos de seguridad a largo plazo. Es necesario, sin embargo, matizar esta declaración, dado que con ella no se quiere decir que la tecnología esté igualmente al alcance de la mano o que, si existe, sea accesible en todos los países e instalaciones con el mismo nivel de refinamiento, ni tampoco que no se requieran más investigaciones. Los programas actuales se caracterizan por el adelanto logrado al pasar de los proyectos generales anteriores a los proyectos actuales específicos a determinados emplazamientos e instalaciones; se requiere todavía más investigación en el curso de la aplicación industrial.

3. Se admite de manera clara que las soluciones oportunas a los problemas institucionales, reglamentarios, financieros y sociopolíticos son requisitos previos de la difusión satisfactoria de la tecnología "disponible" y que dichas cuestiones son particularmente importantes si se quieren disipar los temores del público.

4. Como la principal inquietud se refiere a las consecuencias a largo plazo de la evacuación de desechos sobre la salud y la seguridad, para obtener comprensión y aceptación generales es indispensable presentar una formulación clara de los objetivos y criterios técnicos correspondientes a la seguridad, así como demostrar que dichos objetivos y criterios se pueden lograr.

5. Mucho se ha avanzado a nivel nacional e internacional en el establecimiento de dichos objetivos, criterios y métodos de evaluación de la seguridad. En la conferencia se expusieron medios de aplicar las recomendaciones de la CIPR a las cuestiones concretas de la evacuación de desechos, y se confía actualmente en que durante los próximos años se encontrará solución a ciertas cuestiones de interpretación. Para demostrar la observancia de los requisitos de seguridad a largo plazo, es necesario fiarse de las previsiones. La reducción de incertidumbres y la convalidación de modelos requerirán todavía más trabajos, y los mecanismos que gobiernan los escapes de radionucleidos se comprenderán mejor cuando de los proyectos se obtengan más datos concretamente relacionados con emplazamientos determinados. Por cierto, se requerirán exámenes de expertos para determinar qué constituye una convalidación de la evaluación de seguridad a largo plazo; a este respecto, la realización de nuevas investigaciones y los estudios interdisciplinarios de análogos naturales ayudarán a lograr el consenso.

6. Las repercusiones radiológicas de la producción nucleoelectrónica y los aportes que la gestión de desechos hace a la dosis total de radiación, tanto a largo como a corto plazo, que se derivan de los datos presentados en el informe del UNSCEAR de 1982, así como la

información presentada por la OMS sobre la gestión de desechos químicos tóxicos, permitirá situar a los problemas de la gestión de desechos radiactivos en una perspectiva más adecuada.

7. Si bien la conferencia hizo hincapié sobre todo en la cuestión de la gestión de desechos de alta actividad, hubo igualmente una indicación clara de que la gestión de los desechos de actividad baja e intermedia seguirá requiriendo atención si se quieren satisfacer las necesidades actuales de la industria nuclear en cuanto a eliminar sus desechos convenientemente y sin demoras indebidas. En la conferencia se demostró que la evacuación de tales desechos a poca profundidad o en cavidades rocosas es una práctica bien establecida, utilizada o propuesta en numerosos países. Sin embargo, en ciertos países hay interés por continuar la práctica de vertir los desechos de baja actividad en el mar, conforme a los términos del Convenio de Londres. A fin de responder a los criterios de aceptación de desechos, así como por razones económicas, se observa un constante interés por mejorar tanto las técnicas de reducción de volumen como las formas de los desechos. Se señaló igualmente la necesidad de aplicar una gestión adecuada a los desechos procedentes de las operaciones de clausura y de situaciones de emergencia.

8. La constante búsqueda de mejoras en los enfoques de seguridad, aun en prácticas industriales bien establecidas, y de la creciente inquietud en cuanto al medio ambiente, han puesto de relieve también las consecuencias radiológicas a largo plazo de las colas resultantes de las operaciones de tratamiento del uranio.

9. Muchos países han iniciado, o lo harán en breve, tareas de diseño y de investigación en laboratorios piloto subterráneos de investigaciones para el desarrollo de repositorios de desechos de alta actividad. Se espera que durante los próximos diez o quince años se puedan demostrar repositorios de tamaño real en los Estados Unidos de América y posiblemente también en otros países. En un cierto número de otros países se escogerán los emplazamientos para repositorios que entrarán en servicio después del año 2000.

10. La conferencia subrayó una vez más que la tecnología de que se dispone para el control de efluentes líquidos o gaseosos es lo bastante eficaz como para que la energía nucleoelectrónica se considere una fuente de energía sumamente limpia. No obstante, las emisiones de ciertos radionucleidos al medio ambiente pueden tener consecuencias radiológicas transfronterizas. La solución de estos problemas requiere consenso y orientación a nivel internacional. Un desafío constante es la adaptación de las tecnologías existentes para el tratamiento de efluentes líquidos o gaseosos respecto de determinados radionucleidos, y el mejoramiento de su régimen operacional y diseño, a fin de que los escapes ambientales tengan el valor más bajo que razonablemente se pueda obtener.

En general, la conferencia confirmó las conclusiones de estudios anteriores, a saber: que se puede aprovechar la energía nucleoelectrónica para beneficio de la humanidad sin crear problemas insalvables de eliminación de desechos.