

LOS DESECHOS DE ELEVADA RADIOACTIVIDAD

Métodos de tratamiento y almacenamiento examinados en un simposio del OIEA

Uno de los importantes problemas que plantea la industria de la energía atómica es el del tratamiento de los desechos radiactivos producidos durante el funcionamiento de los reactores; este problema irá adquiriendo mayor magnitud, ya que con el desarrollo de dicha industria el volumen de los desechos radiactivos aumentará cada vez más. Es preciso, pues, encontrar procedimientos que permitan reducir hasta el mínimo compatible con un estado determinado de la tecnología los riesgos que entrañan los subproductos radiactivos de las instalaciones nucleares, pero al mismo tiempo conviene lograr que esos procedimientos sean suficientemente prácticos y económicos para poder aplicarlos en gran escala.

La seguridad debe ser, desde luego, el criterio primordial: en los centros de energía nuclear del mundo entero se llevan a cabo trabajos de investigación con objeto de hallar los métodos más seguros y eficaces de tratamiento de los desechos radiactivos. Desde sus comienzos, el Organismo Internacional de Energía Atómica ha considerado que una de sus principales funciones consistía en estimular y coordinar esos esfuerzos; los trabajos que lleva a cabo en este terreno constituyen, en realidad, uno de sus programas más completos. Una parte importante de ese programa ha sido la organización de reuniones científicas para examinar diversos aspectos del tratamiento de los desechos radiactivos.

Algunos de estos aspectos han sido ya tratados o son actualmente estudiados por pequeños grupos de expertos convocados por el Organismo, mientras que los problemas científicos y técnicos de orden general se examinan en reuniones de mayor amplitud. Para su estudio, el Organismo ha clasificado los problemas en dos grupos generales: los relativos a los desechos de gran volumen pero de baja actividad y los referentes a los desechos de volumen relativamente pequeño pero de actividad muy elevada. Aunque la distinción entre baja y elevada actividad se basa hasta cierto punto en razones de conveniencia, se consideran corrientemente desechos de baja actividad los producidos durante el funcionamiento de los pequeños reactores de investigación o los derivados de las aplicaciones de los radioisótopos, y desechos de elevada actividad los producidos en las instalaciones de regeneración del combustible agotado (por ejemplo, el de las centrales nucleoelectricas). Estos últimos no sólo poseen una elevada radiactividad sino que, en muchos casos, la conservan durante períodos muy prolongados, a menudo durante miles y aun cientos de miles de años. Estas dos características unidas hacen particularmente difícil el tratamiento

de esas sustancias. Si el nivel de actividad es muy bajo, es posible a veces dispersar los desechos en el medio ambiente, pero si se trata de sustancias de elevada radiactividad, es preciso aislarlas. Si los productos radiactivos son de período corto, basta con un aislamiento temporal; en cambio los desechos de elevada radiactividad y de período largo pueden exigir su aislamiento durante miles de años. En otras palabras, deben ser almacenados de tal manera que no puedan dispersarse por el medio ambiente mientras sigan siendo posibles fuentes de riesgos radiactivos; suele ser necesario, además, someterlos a diversos procesos químicos para ponerlos en condiciones de ser almacenados.

Esta tarea es muy complicada; en realidad, el tratamiento y almacenamiento de los desechos de radiactividad elevada es el problema más difícil de los que plantean los desechos atómicos. Para dar una idea de su magnitud basta indicar que sólo en los Estados Unidos se han almacenado ya en tanques subterráneos más de 50 millones de galones de desechos de ese tipo. Si se tienen en cuenta los extensos programas nucleares de algunos otros países y el probable desarrollo de la industria de la energía nucleoelectrica en muchas partes del mundo, se pueden llegar a calcular aproximadamente las grandes cantidades de desechos de elevada actividad que habrá que almacenar en condiciones de seguridad durante los años venideros.

El Simposio Internacional de Viena

Del 8 al 12 de octubre de 1962 se celebró en Viena un simposio internacional convocado por el Organismo para examinar los métodos de tratamiento y almacenamiento de los desechos de elevada radiactividad. Participaron en este simposio 130 hombres de ciencia de 19 países y representantes de la Agencia Europea de Energía Nuclear y del EURATOM.

Dejando aparte el examen general de los problemas y de los procedimientos corrientemente aplicados para resolverlos, el programa del Simposio se dividió en seis partes: 1) concentración y almacenamiento; 2) solidificación y fijación de líquidos por calcinación; 3) solidificación y fijación por vitrificación; 4) solidificación y fijación por métodos diversos; 5) tratamiento de desechos sólidos; 6) transporte de grandes cantidades de radionúclidos. Presidieron las distintas sesiones del Simposio los siguientes hombres de ciencia: P. Dejonghe (Bélgica), F. Duhamel (Francia), E. Glueckauf (Reino Unido), L. P. Hatch (Estados Unidos), B. Kolychev (URSS) y D. Pearce (OIEA).

Al declarar abierto el Simposio, el Sr. Pierre Balligand, Director General Adjunto de Actividades Técnicas del Organismo, señaló que era la primera vez que el Organismo convocaba una reunión científica dedicada a estudiar concretamente los problemas relativos al tratamiento y almacenamiento de los desechos procedentes de la regeneración química de los combustibles nucleares. Agregó que se había estimado oportuno organizar la reunión porque recientemente se habían obtenido datos sobre el diseño, la construcción y el funcionamiento de diversas instalaciones de índole experimental para el tratamiento y almacenamiento de desechos de elevada radiactividad. El Dr. Dennis Pearce, Director de la División de Salud, Seguridad y Eliminación de Desechos Radiactivos del Organismo, manifestó que el intercambio de información que el Simposio permitiría llevar a cabo no sólo sería útil para los científicos de los países adelantados que ya se esfuerzan por resolver los problemas que plantean los desechos, sino también para los científicos de aquellos países que probablemente tendrán que enfrentarse con dichos problemas en un futuro próximo.

Las memorias presentadas a la reunión versaban sobre los procedimientos que actualmente se aplican para el tratamiento de los desechos de elevada actividad en los países adelantados en materia de energía atómica, y sobre los estudios y experimentos encaminados a hallar mejores métodos para resolver el problema. De la información facilitada en la reunión se desprende que entre los criterios seguidos en los países en que es preciso tratar desechos de elevada actividad existe una gran analogía. En casi todos los casos esos desechos se almacenan en tanques subterráneos de acero inoxidable y hormigón. Pero como algunos de los desechos conservarán su radiactividad durante un tiempo más prolongado que el período de duración física de los tanques más sólidamente contruidos, en todos los países se ha tratado de encontrar un método adecuado para solidificar los desechos o para fijarlos en una sustancia sólida a fin de impedir su dispersión por el medio ambiente una vez destruidos los recipientes. Se convino en que la solución definitiva del problema de los desechos de elevada actividad consistirá en inmovilizarlos de tal forma que queden permanentemente aislados del medio ambiente humano.

Para la solidificación y fijación se consideraron dos métodos principales: 1) la calcinación, que consiste en calentar los desechos líquidos hasta transformarlos en óxidos sólidos, y 2) la vitrificación, es decir, la fijación e incorporación de los desechos en vidrio o en sustancias análogas al vidrio. Se estimó, en general, que la formación de óxidos sólidos representaría un progreso considerable hacia la inmovilización de los desechos pero que no constituiría una solución definitiva ya que, en ciertas condiciones, las sustancias radiactivas incorporadas a los óxidos podrían quedar en libertad y pasar al medio ambien-

te. La fijación en vidrio sería, en cambio, prácticamente permanente; algunas de las memorias presentadas al Simposio trataban de los trabajos que se están llevando a cabo para perfeccionar este método.

Procedimientos corrientes y planes para el futuro

En su memoria sobre la concentración y el almacenamiento de los desechos de elevada radiactividad durante las primeras etapas del programa civil de energía nucleoelectrica del Reino Unido, el Sr. D. W. Clelland (Reino Unido) explicó que en las operaciones de regeneración del combustible irradiado, se forman dos clases de desechos de elevada radiactividad: un desecho sólido -producido al quitar el revestimiento del combustible- que se deposita en silos de hormigón y no plantea problemas técnicos graves, y un desecho líquido, que se produce cuando, una vez quitado el revestimiento, el combustible irradiado se disuelve en ácido nítrico y se somete a un proceso para separar el uranio y el plutonio de los productos de fisión; el desecho contiene esos productos una vez extraídos el uranio y el plutonio.

El Sr. Clelland dijo que el procedimiento actualmente aplicado en el Reino Unido para tratar los desechos líquidos de elevada actividad consiste en concentrar el líquido ácido por evaporación para almacenarlo en tanques de acero inoxidable que se depositan en cámaras de hormigón de pared gruesa. Las paredes de estas cámaras se revisten de acero inoxidable para constituir un confinamiento secundario; el calor producido por la desintegración radiactiva de los productos de fisión se evacua mediante una corriente de agua que circula por serpentines dentro de los tanques de almacenamiento.

Los Sres. M. Chambon y J. Rodier (Francia) describieron los procedimientos que se aplican en la planta de extracción de plutonio de Marcoule para concentrar y almacenar los productos de fisión. Los efluentes de actividad muy elevada se concentran por evaporación a la presión atmosférica. La solución concentrada se transporta luego, por gravedad, hasta unas cubas de acero inoxidable, de 60 m³ de capacidad útil, y se enfría por circulación de agua en circuito cerrado en la piscina en que está sumergida cada cuba y en los serpentines internos. Se controlan constantemente el volumen y la temperatura de los líquidos almacenados, así como la presión en las cubas y la actividad en los circuitos de enfriamiento.

En una memoria presentada por B. F. Campbell, E. Doud y R. E. Tomlinson (Estados Unidos de América) se exponían los métodos que actualmente se aplican en los Estados Unidos. Para su almacenamiento, los desechos de elevada actividad se clasifican en dos categorías, según el contenido de productos de fisión. La primera categoría comprende los desechos que se calientan espontáneamente, es decir, aquellos en los cuales la desintegración radiactiva de

los productos de fisión desarrolla suficiente calor para elevar la temperatura del líquido hasta el punto de ebullición, mientras que la otra categoría incluye los desechos que no se calientan espontáneamente, o sea, los desechos de menor actividad pero que contienen sustancias radiactivas en tal proporción que es preciso almacenarlos en condiciones de seguridad. En el caso de los desechos que se calientan espontáneamente, es necesario tomar medidas especiales para conseguir que el calor generado se disipe sin riesgo alguno.

Por lo que respecta al almacenamiento, los autores de la memoria indicaron que se ha utilizado una gran variedad de tanques, según el volumen y la composición de los desechos, las condiciones del medio ambiente y otros factores. La capacidad de la mayoría de dichos tanques oscila entre 300 000 y 1 330 000 galones; tienen entre 50 y 85 pies de diámetro y su profundidad útil varía entre 18 y 32,5 pies. Los tanques se cubren generalmente con una capa de tierra de 7 a 10 pies de espesor, que actúa como blindaje para las radiaciones. Como ejemplo, describieron el tipo de tanque utilizado en Hanford para el almacenamiento de los desechos que se calientan espontáneamente: es un tanque de hormigón armado revestido de acero al carbono hasta un nivel superior al del líquido, pero sin revestimiento en la tapa.

En otra memoria, el Sr. R. E. Tomlinson describió el programa de tratamiento y evacuación de desechos de elevada radiactividad que se aplica en la planta de Hanford de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos. Ese programa tiene por objeto controlar y reducir a un mínimo los riesgos, recuperar los subproductos que necesita la citada Comisión y reducir el costo del tratamiento de los desechos. Se ha llegado a la conclusión de que en Hanford la mejor forma de tratar los desechos de elevada actividad consiste en el fraccionamiento de los desechos y en su solidificación dentro de los tanques. Aunque el almacenamiento continuo en tanques resulta más económico, se considera que el fraccionamiento ofrece mayor seguridad por lo que respecta al confinamiento a largo plazo de los núclidos peligrosos, y facilita la recuperación de los productos de fisión. Se están realizando estudios y experimentos para adquirir los conocimientos tecnológicos necesarios. No obstante, el Sr. Tomlinson hizo observar que estas conclusiones se refieren especialmente a la planta de Hanford y que, por lo tanto, no son necesariamente válidas para otras instalaciones.

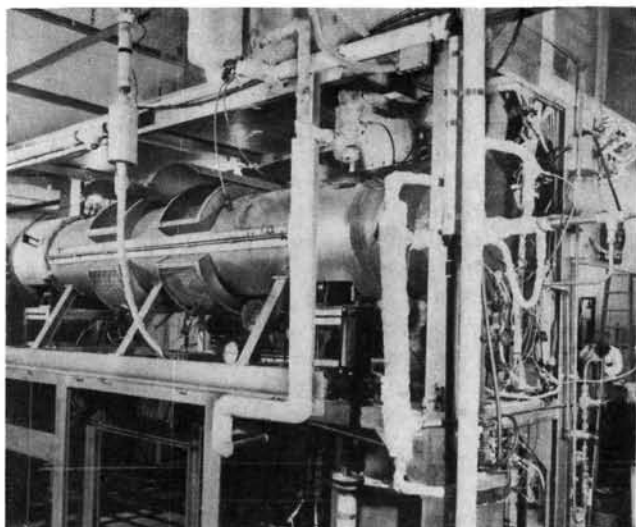
El Sr. Belter (Estados Unidos de América) expuso los programas que se ejecutan o se están preparando en su país. Indicó que si bien el almacenamiento provisional en tanques diseñados según los conceptos actuales resulta económico en lugares que reúnan las condiciones geológicas e hidrológicas adecuadas, las limitaciones inherentes a este procedimiento, tales como la necesidad de prever posibles

escapes y la de efectuar el transporte de desechos líquidos durante centenares de años, ha inducido a establecer un programa de investigaciones y experimentos encaminados a encontrar sistemas técnicamente prácticos para la evacuación definitiva. En el programa de tratamiento de desechos de elevada actividad de la División de Desarrollo de Reactores de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos se trata de encontrar la solución mediante dos procedimientos generales: 1) la conversión de los desechos en óxidos sólidos o la fijación de las sustancias activas en un vehículo sólido, inerte, no lixiviable, y 2) la evacuación directa de los desechos en formaciones geológicas tales como las estructuras salinas, las rocas cristalinas impermeables, etc.

En un examen general de los procedimientos de tratamiento de los desechos y de los planes establecidos a ese respecto en la Unión Soviética, el Sr. B. Kolychev (Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas) declaró que actualmente los desechos líquidos se tratan a fin de reducir su volumen y concentrar su actividad y que, una vez concentrados, se almacenan en tanques de acero inoxidable. Sin embargo, los hombres de ciencia soviéticos comprenden que los tanques de acero no pueden utilizarse para un almacenamiento definitivo y, por lo tanto, tratan de hallar procedimientos que permitan transformar los desechos de modo que se puedan almacenar permanentemente. Han estudiado la posibilidad de aprovechar formaciones salinas naturales pero este método no parece muy adecuado para los desechos líquidos ni muy ventajoso en el caso de los desechos sólidos. El procedimiento de enterrar los desechos líquidos en formaciones geológicas profundas es muy atrayente, pero es muy difícil de estudiar y no es seguro que puedan obtenerse resultados totalmente fidedignos a partir de los ensayos. "Consideramos, dijo el Sr. Kolychev, que el procedimiento de almacenamiento de desechos radiactivos que mejores perspectivas ofrece es el que se basa en los métodos de solidificación y, más particularmente, en los de vitrificación, porque ésta es la técnica que permitirá depositar los desechos radiactivos bajo tierra en forma permanente, con toda seguridad y con la posibilidad de aplicar un control riguroso".

Método de solidificación

Científicos de los Estados Unidos presentaron varias memorias sobre diferentes métodos de solidificación de desechos radiactivos líquidos por calcinación, esto es, por calentamiento muy intenso. En una memoria preparada por W. R. Regan, L. P. Hatch y R. F. Domish, se señaló que la calcinación de desechos acuosos de elevada actividad con alto contenido de sales, que permite convertir estas sales en sólidos estables, ofrece notables ventajas, a saber, una reducción considerable del volumen de los desechos y una simplificación general de los problemas de almacenamiento a largo plazo. Los autores describieron un dispositivo de calcinación, actualmente



Horno calcinador giratorio de tipo experimental para la solidificación de desechos de elevada radiactividad (fotografía tomada de la memoria redactada por W.H. Regan, L.P. Hatch y R.F. Demish)

en curso de perfeccionamiento en el Brockhaven National Laboratory, que se basa en el principio del horno de bolas rotatorio. Consta esencialmente de un horno en forma de tubo horizontal animado de un lento movimiento de rotación, y calentado exteriormente por resistencias eléctricas. Los desechos líquidos se introducen en el horno por medio de una boquilla de distribución y caen sobre un lecho caliente, poco profundo, de bolas metálicas; los sólidos calcinados rebosan por el extremo de descarga y pasan a un acumulador de polvo.

Otros cuatro científicos estadounidenses (W.E. Winsche, M.W. Davis, Jr., C.B. Goodlett, Jr., y E.S. Occhipinti) describieron un nuevo procedimiento de calcinación, basado en las peculiares propiedades del azufre, que se está elaborando en el Savannah River Laboratory. Según dicho procedimiento, los desechos acuosos ácidos se hacen reaccionar con azufre fundido a 150°C , con lo cual se eliminan el agua y los ácidos volátiles, mientras que los compuestos químicos presentes en los desechos quedan calcinados y/o químicamente reducidos. La suspensión azufre-desechos así formada se continúa calentando y/o reduciendo hasta alcanzar una temperatura de 400 a 444°C a fin de eliminar el agua residual y el ácido sulfúrico. En estas operaciones, el azufre fundido actúa, entre otras cosas, como agente de transmisión de calor. Una vez terminado el tratamiento a temperatura elevada, la suspensión azufre-desechos se enfría hasta alcanzar de 120° a 150°C y se transvasa estando todavía líquida al sistema definitivo de confinamiento donde se deja que se solidifique.

En la conferencia se describieron tres otros métodos de calcinación denominados de calcinación en crisol, de calcinación en lecho fluidificado y de cal-

cinación por pulverización y calentamiento radiante. El método de calcinación en crisol, que se está elaborando en el Oak Ridge National Laboratory, consiste en evaporar los desechos líquidos en un crisol que se utiliza después como recipiente de transporte y de almacenamiento definitivo; la calcinación se efectúa a temperaturas comprendidas entre 700° y 900°C . El método de calcinación en lecho fluidificado consiste en inyectar la solución de desechos por toberas pulverizadoras en un lecho fluidificado en el que el agua se evapora, el ácido nítrico se descompone formando agua y óxido de nitrógeno, y los nitratos metálicos se descomponen para formar los óxidos correspondientes. El método de calentamiento radiante consiste en introducir los desechos líquidos por una tobera pulverizadora en la parte superior de una columna de calcinación; las paredes de ésta se calientan hasta 850°C haciendo pasar una corriente de baja tensión por toda la columna y las gotas de agua que descienden a lo largo de la misma atraviesan zonas sucesivas de evaporación, secado y calcinación.

Pese a las ventajas que presenta con respecto a los métodos actuales de almacenamiento en depósitos, la calcinación de desechos líquidos no inmoviliza tales desechos de manera permanente, como se ha señalado anteriormente; los ácidos formados por calcinación no son resistentes a la lixiviación y las sustancias radiactivas pueden por lo tanto pasar al medio ambiente en determinadas circunstancias. En el Simposio se hizo observar que si bien la calcinación puede representar un progreso considerable respecto de los actuales métodos de almacenamiento, no debe considerarse sino como una etapa intermedia en el camino hacia la evacuación "definitiva"; es posible lograr una inmovilización mucho más eficaz -en efecto, prácticamente permanente- fijando los desechos en un sólido apropiado resistente a la lixiviación como, por ejemplo, en vidrio. En el curso de los últimos años, se han realizado amplias investigaciones con el fin de elaborar métodos de fijación de los desechos radiactivos en vidrio; científicos del Reino Unido, de los Estados Unidos y de otros países dieron a conocer en el Simposio una serie de resultados prometedores.

Se hizo observar que la fijación de los desechos radiactivos en vidrio permite obtener un producto definitivo que presenta varias propiedades ventajosas. Por ejemplo, los residuos en forma de sólido vítreo no son volátiles a temperaturas inferiores a las de su formación, poseen una resistencia mecánica adecuada, de modo que su confinamiento no depende exclusivamente de la integridad de un recipiente externo, tienen buena conductividad térmica, de forma que los problemas de transmisión de calor se reducen al mínimo y su solubilidad en un medio ambiente erosivo es escasa, si bien es verdad que para poseer estas propiedades el producto resultante no ha de ser un vidrio en el sentido estricto de la palabra.

W.E. Clark y H.W. Godbes (Estados Unidos) describieron los trabajos que se realizan en los laboratorios de Oak Ridge con miras a poder incorporar desechos de elevada radiactividad en vidrios insolubles de gran densidad, que contengan todos los componentes radiactivos en la fracción sólida. Afirmaron que los experimentos realizados hasta ahora demuestran que tal procedimiento es técnicamente factible.

En una memoria presentada por W.G. Belter, a la que ya se ha hecho referencia, se describió un procedimiento de fijación de material cerámico esponjoso. Dicho procedimiento consiste en preparar una masa arcillosa muy porosa que se calienta hasta $1\,100^{\circ}\text{C}$, aproximadamente. Esta masa se embebe a continuación en el desecho líquido, se seca y se vuelve a embeber varias veces. Finalmente se calienta a $1\,300^{\circ}\text{C}$ para fijar de manera permanente los radionúclidos en el material cerámico.

En una memoria redactada por L.P. Hatch, G.C. Veth y E.J. Tuthill (también de los Estados Unidos) se informó sobre un procedimiento que se está elaborando en el Brookhaven National Laboratory, con arreglo al cual todo el proceso de conversión, desde los desechos acuosos en bruto hasta el producto vítreo final, podría efectuarse enteramente en la fase líquida.

M.N. Elliot, R. Gayler, J.R. Grover y W.R. Hardwick (Reino Unido) informaron acerca de la experiencia adquirida en una instalación piloto de Harwell en materia de fijación de desechos radiactivos en vidrio, y describieron un procedimiento para convertir los desechos constituidos por productos de fisión de elevada radiactividad en un vidrio resistente a la corrosión, contenido en recipientes cilíndricos de acero inoxidable en el que se incorporarán hasta el 40 por ciento de los óxidos residuales. Los autores manifestaron que dichos recipientes formaban la base de un sistema de almacenamiento capaz de durar siglos. La explotación de una planta piloto ha demostrado el carácter práctico del procedimiento y se han realizado con resultado satisfactorio buen número de ciclos de trabajo, produciéndose bloques de vidrio, resistentes a la corrosión, de 50 kg a partir de una solución de desechos simulados de baja actividad. La etapa siguiente consistirá en trabajar con soluciones suficientemente radiactivas para poder medir los factores de descontaminación correspondientes a los productos de fisión importantes y probarlos métodos de accionamiento a distancia. Se ha proyectado y construido una instalación piloto para producir bloques de vidrio que contengan 1 000 curies de actividad.

En una memoria referente a la incorporación de radioisótopos en silicatos fundidos, presentada por J. Rálková y J. Saidl (Checoslovaquia), se expusieron las investigaciones realizadas con el fin de seleccionar tipos de rocas fundidas y de silicatos ví-



Aspecto de una masa vítrea que contiene desechos radiactivos (fotografía tomada de la memoria presentada por M.N. Elliot, R. Gayler, J.R. Grover y W.H. Hardwick)

treos que se presten para la incorporación de radioisótopos de período largo y biológicamente peligrosos, así como de determinar los factores que pueden influir en la velocidad de liberación de los isótopos incorporados.

Otras cuestiones

En los casos en que se disponga de formaciones geológicas adecuadas, quizá sea posible almacenar desechos de elevada actividad sin someterlos a tratamiento alguno, pues por sus características esos lugares de almacenamiento ofrecen una protección adecuada contra la difusión de los desechos en el medio ambiente. En los Estados Unidos se han efectuado varios estudios sobre la posibilidad de evacuar desechos líquidos y sólidos de elevada actividad en estructuras salinas. Las formaciones salinas naturales ofrecen varias ventajas como lugares para el almacenamiento de desechos radiactivos. Entre ellas, cabe citar la impermeabilidad de la sal debida a sus propiedades plásticas, su buena conductividad térmica, su satisfactoria resistencia mecánica y "el no presentarse asociada a los recursos hidráulicos subterráneos aprovechables". Científicos norteamericanos comunicaron que el almacenamiento de desechos de elevada radiactividad en minas de sal presenta perspectivas interesantes, si bien determinados aspectos de la cuestión deben estudiarse más a fondo. En lo que respecta a la evacuación de desechos sólidos, una de las principales incógnitas es el efecto combinado del calor y de la presión sobre la estabilidad estructural de las galerías de las minas. En cuanto a la evacuación de desechos líquidos, la formación de gases por radiólisis y las alteraciones de las cavidades de las minas plantean ciertos problemas.

Otra de las cuestiones examinadas en el Simposio fue el transporte de grandes cantidades de radionúclidos útiles recuperados de los desechos. Algunos productos de fisión radiactivos, tales como el estroncio-90, el cesio-137 y el cerio-144, encuentran aplicaciones importantes como fuentes de calor o de radiaciones. Dado que los lugares de aprovisionamiento de estos productos de fisión se encuentran muy alejados de los de consumo, es preciso embalar y transportar estos núclidos en grandes cantidades. Las expediciones de este tipo están expuestas a accidentes de índole diversa y en el Simposio se examinaron algunos problemas que tales operaciones pueden plantear.

Otro asunto importante que se tomó en consideración en las deliberaciones fue el costo de las operaciones de tratamiento y evacuación de desechos. J.J. Perona, R.L. Bradshaw, J.T. Roberts y J.O. Blomeke (Estados Unidos) presentaron una evaluación económica de los procedimientos de almacenamiento en tanques y calcinación en crisoles de los desechos procedentes de la regeneración del combustible de los reactores de potencia.

Refiriéndose a los aspectos económicos de la evacuación de desechos, W.J. Belter manifestó en su memoria: "No se ha determinado la fracción del costo de la energía nucleoelectrónica atribuible a la eva-

cuación de desechos, y ... hasta ahora no se ha efectuado un cálculo realista de los gastos que supondrían los métodos de evacuación definitiva. En cambio, se estima que los gastos de almacenamiento de desechos en depósitos de las características actuales que deban ser sometidos a "vigilancia perpetua", oscilan entre 0,1 y 0,15 mil por kWh de energía nucleoelectrónica generada. Estos gastos sólo representan el 1 al 2 por ciento, aproximadamente, del costo de la energía nucleoelectrónica producida a razón de 8 a 10 mil/kWh. Los estudios técnicos y económicos efectuados por el Oak Ridge National Laboratory muestran que los gastos totales de almacenamiento provisional de desechos líquidos, calcinación en crisol y transporte en una distancia de 3 000 millas (viaje de ida y vuelta) pueden reducirse a 0,02 mil/kWh(e). Se calcula que la evacuación en gran escala de sólidos calcinados en formaciones salinas costaría 0,01 mil/kWh(e), aproximadamente. Habida cuenta de la experiencia adquirida gracias a los trabajos de laboratorio y a la explotación de plantas piloto inactivas, así como de las posibilidades de éxito de un programa referente a desechos de elevada actividad que se ejecutará sobre el terreno con fines de demostración y ensayo, hay razones de peso para creer que las operaciones de tratamiento y evacuación de desechos no deberían constituir un grave obstáculo para la expansión de la energía nucleoelectrónica en condiciones rentables".