

Gestión de desechos de alta actividad

por Wm. L. Lennemann

¿QUE SON LOS DESECHOS DE ALTA ACTIVIDAD?

Los términos "desechos de actividad baja, media o intermedia, y alta" de uso universal, significan los desechos con diferentes concentraciones de radionucleidos o de radiactividad. Esos términos empezaron a usarse en los años 50 con fines operacionales y suelen indicar la manera de tratar o manipular el desecho y lo que se hace con él en las distintas condiciones que reinan en diferentes lugares, en vez de definir exactamente las concentraciones de radiactividad o su grado de contaminación. Esto sigue siendo cierto hoy día en que las tres categorías se clasifican o definen cuantitativamente de manera distinta de un país a otro e incluso entre instituciones de un mismo país [1, 2].

En los últimos diez años ha habido considerables debates encaminados a definir cuantitativamente los desechos de actividad baja, media y alta desde el punto de vista de la radiactividad, a fin de evitar confusiones. Por otra parte, se observa una considerable resistencia a definir cuantitativamente estos términos porque un curio de radioestroncio no se manipula ni tiene los mismos efectos que un curio de plutonio, que también difieren de un curio de tritio, y así sucesivamente para los distintos radionucleidos. Además, las definiciones de los desechos de actividad baja, media y alta no serían las mismas si se considerasen desde el punto de vista de la física sanitaria, las operaciones, el transporte, el vertimiento en el mar, etc. Sin embargo, los términos actividad baja, media o intermedia y alta, dentro de estas amplias y superpuestas categorías, suelen tener significado para quienes trabajan en la gestión de desechos radiactivos y utilizan su tecnología.

Como su nombre indica, los desechos de alta actividad se caracterizan por un alto nivel radiactivo, pero probablemente su rasgo más distintivo es que, debido a la carga térmica de su radiodesintegración, requieren manipulación y tratamiento especiales, tales como un espeso blindaje biológico y sistemas técnicos de refrigeración. El término "desecho de alta actividad" supone generalmente un refinado (efluente líquido) procedente del primer ciclo de las operaciones de reelaboración del combustible para recuperar el plutonio y el uranio no quemado. El término se aplica también a cualquier matriz que, por contener una concentración suficientemente elevada de productos de fisión — que, a menos que estén separados de los desechos, incluyen los actínidos (elementos transuránicos emisores alfa) —, requiere enfriamiento. A título de ejemplo baste citar los desechos solidificados de alta actividad o los combustibles gastados "desechados" y posiblemente las vainas troceadas. Otros ejemplos de lo que a veces se consideran desechos de alta actividad son los componentes del reactor separados y altamente irradiados, tales como las barras de control, las tuberías y conductos por donde fluye el líquido, y un contenedor con varios millones de curios del producto gaseoso de fisión, el criptón-85.

Mis observaciones en el presente artículo se refieren sobre todo a la gestión de desechos nucleares altamente radiactivos producidos en el interior del combustible nuclear durante su

El Sr. Lennemann es Jefe de la Sección de Tratamiento y Evacuación de Desechos, División de Seguridad Nuclear y Protección del Medio Ambiente, OIEA.

quemado (irradiación) en un reactor. Igualmente, a menos que se indique lo contrario, mis observaciones se aplican a los combustibles de los reactores de agua ligera (LWR), aunque en principio también son ciertos de los desechos nucleares generados en otros tipos de combustible.

La principal consideración en la gestión de los desechos de alta actividad es asegurar su aislamiento de la biosfera y evitar fugas significativas de radionucleidos, por lo menos en concentraciones que puedan ser peligrosas para el hombre, durante el amplio intervalo de tiempo en el que esta posibilidad exista. Los expertos en gestión de desechos nucleares coinciden generalmente en que un plan de gestión satisfactorio para este tipo de desechos puede basarse en la siguiente secuencia de operaciones:

- almacenamiento provisional en estado líquido (para desechos líquidos);
- solidificación (para desechos líquidos) y embalaje;
- embalaje técnico de los desechos sólidos;
- evacuación de los desechos sólidos en formaciones geológicas (ya sea en la tierra o en el subsuelo oceánico).

La Figura 1 ilustra esta secuencia. Mis observaciones se ajustarán al curso de las operaciones indicadas en la Figura 1. Son posibles también otras estrategias que se mencionarán. Con excepción del proceso francés de vitrificación que recientemente ha empezado a utilizarse a plena escala en Marcoule, las actuales prácticas industriales empleadas con los combustibles de los reactores de potencia no han pasado de la primera etapa de la secuencia, pero se hallan en curso considerables trabajos de investigación y desarrollo sobre procesos de solidificación e instalaciones técnicas de almacenamiento provisional. Asimismo, se trabaja considerablemente en la evaluación de posibles emplazamientos de evacuación o cementerios de desechos en formaciones geológicas. Estos aspectos se examinarán más adelante.

REELABORACION DEL COMBUSTIBLE Y DESECHOS DE ALTA ACTIVIDAD

La actual secuencia de operaciones de reelaboración de los combustibles de los reactores de potencia, — que probablemente se seguirá utilizando todavía durante cierto tiempo — consiste en trocear o cortar un elemento combustible en pequeños trozos, o separar la vaina de alguna otra manera, y disolver el combustible en una solución acuosa de ácido nítrico. El plutonio y el uranio no quemado (materiales fisionables) se recuperan por separación química. La solución restante de ácido nítrico, que contiene productos químicos añadidos durante el proceso, más del 99% de los productos de fisión no volátiles, junto con impurezas procedentes de los materiales de las vainas, productos de corrosión, varias décimas de 1% del uranio y del plutonio disueltos originalmente y la mayoría de los actínidos, constituye los denominados desechos de alta actividad. Según el combustible utilizado y la secuencia de operaciones de reelaboración, se producen por tonelada de combustible reelaborado alrededor de 5 a 10 m³ de estos desechos líquidos de alta actividad. Esos desechos son tratados para extraer cualquier solvente orgánico restante, y eventualmente se concentran por evaporación hasta alrededor del 5 al 15% de su volumen inicial a fin de almacenarlos en tanques especialmente diseñados para ese fin; el grado de concentración en los desechos depende de la naturaleza de los mismos, de la formación de precipitados y de la capacidad de enfriamiento de los tanques de desechos. El resultado de la reelaboración de los combustibles de los LWR son unos 15 m³ de desechos líquidos de alta actividad por cada 1000 MW(e) generados anualmente.

El Cuadro 1 indica los desechos de alta actividad procedentes de diferentes tipos de reactores y las técnicas de reelaboración del combustible. La gestión de estos desechos debe integrarse con el funcionamiento de la instalación de reelaboración y no puede realizarse a corto plazo. Debe preverse, estudiarse y planificarse con muchos años de antelación. La doctrina

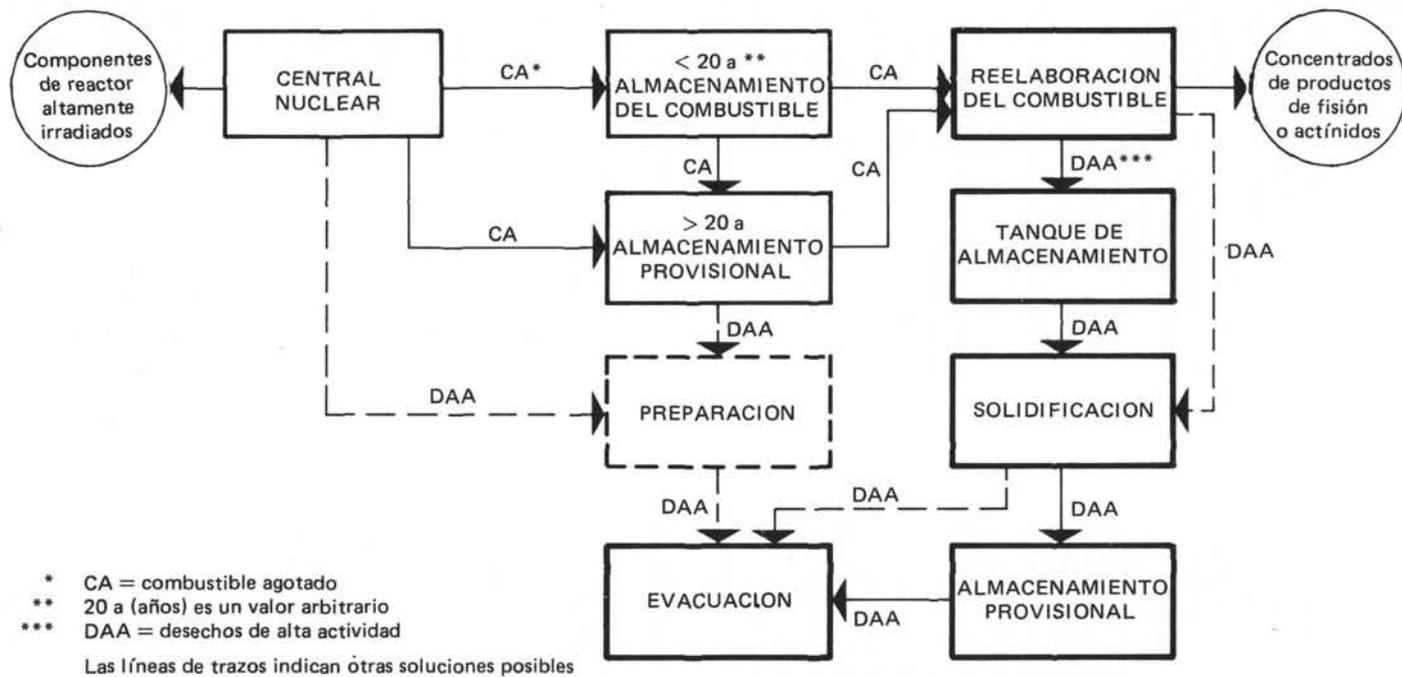


Figura 1. Manipulación de desechos radiactivos de alta actividad

generalmente aceptada es que los desechos líquidos de alta actividad deben solidificarse para impedir sus desplazamientos en el futuro.

ALMACENAMIENTO DE DESECHOS LIQUIDOS DE ALTA ACTIVIDAD

Actualmente la opinión más extendida es que los concentrados de desechos líquidos de alta actividad resultantes de la reelaboración de los combustibles de reactores de potencia deben mantenerse en estado ácido en tanques de acero inoxidable de gran integridad. (La neutralización de los desechos ácidos con sosa cáustica y su almacenamiento en tanques de acero al carbono no se consideran la mejor solución, ya que se aumenta así considerablemente el volumen, se forman precipitados y barros y se limitan las posibilidades de subsiguiente tratamiento de los desechos.)

Los contenedores de desechos (tanques) se instalan en cámaras subterráneas o en celdas de hormigón de gruesos muros para conseguir un blindaje adecuado, las cuales son de doble pared o están revestidas de acero para retener las fugas del contenedor o contenedores primarios. Deben, por consiguiente, tener capacidad suficiente para retener todo el contenido de un tanque. Los tanques de acero inoxidable pueden contener de 70 a 1000 m³. Se dispone de sistemas de refrigeración (agua) para eliminar el calor de desintegración, con instalaciones de refrigeración auxiliares de emergencia, manteniéndose la temperatura de la solución por debajo de 65°C a fin de reducir la corrosión del acero inoxidable. En los conjuntos de tanques de almacenamiento (parques de tanques) debe disponerse también los necesarios dispositivos de agitación, ventilación, vigilancia, trasvase de la solución desde los contenedores interiores y exteriores, condensación del vapor, extracción de los gases producidos por radiólisis, y filtración de los gases residuales.

En el diseño y la construcción de un parque de tanques para almacenar desechos líquidos de alta actividad debe tenerse presente la conveniencia de contar con dispositivos para llenar y vaciar los tanques repetidamente, de evitar las obstrucciones que interfieran con el vaciado o la descontaminación de los contenedores tanto internos como externos y de dejar entre el contenedor interno y el externo y la cámara vanos suficientes para la inspección y mantenimiento adecuados. Deben instalarse numerosos dispositivos e instrumentos de vigilancia del tanque para conocer los niveles y la temperatura del tanque y del líquido y detectar posibles fugas. Es preferible efectuar el trasvase de líquidos por gravedad que por bombeo. Para los casos de emergencia conviene disponer en todo momento de suficiente volumen vacío, de ser posible un tanque de reserva. Los tanques destinados a los desechos deben proyectarse y construirse con mucha antelación a fin de estar listos cuando se necesiten. La gestión de un parque de tanques para desechos radiactivos líquidos requiere una planificación cuidadosa con varios años de antelación.

En varios países se ha demostrado que el almacenamiento de desechos líquidos de alta actividad en tanques durante períodos de muchos años puede realizarse sin riesgos. En los Estados Unidos se han producido algunas fugas en tanques de almacenamiento. Sin embargo, se trataba de los primeros tipos de tanque de acero suave. No ha habido fugas ni se han presentado otros problemas importantes como consecuencia del almacenamiento de desechos ácidos en tanques de acero inoxidable, los cuales han demostrado ser seguros y convenientes hasta la fecha. Permiten la flexibilidad en las operaciones y ofrecen la gama más amplia de opciones para el futuro tratamiento de desechos. Igualmente, son satisfactorios durante un considerable período de tiempo. Con todo, los tanques de desechos tienen una vida útil limitada y exigen dispositivos de eliminación del calor y otros sistemas auxiliares.

En consecuencia, debe mantenerse una vigilancia adecuada y disponer de tanques de repuesto para hacer frente a fallos imprevistos. Finalmente, en caso de uso continuo, será necesario renovar los tanques.

Sin embargo, se opina en general que el almacenamiento de desechos líquidos de alta actividad debe constituir únicamente una medida provisional y que esos desechos deben solidificarse siempre que ello sea practicable. La solidificación aumenta la inmovilidad de los desechos y hace más difícil su dispersión. Además los desechos sólidos son de más fácil transporte, almacenamiento y/o evacuación.

SOLIDIFICACION DE DESECHOS DE ALTA ACTIVIDAD

Como se ha indicado antes, la finalidad primaria de un proceso de solidificación es transformar una solución de desechos de alta actividad en un sólido, que es menos móvil, más estable, requiere menos vigilancia y se adapta mejor al transporte, almacenamiento y evacuación. En términos ideales, el estado sólido final debe satisfacer ciertos criterios, por ejemplo, poseer una alta estabilidad térmica y a las radiaciones junto con una buena conductividad térmica y un elevado punto de fusión. Debe conservar su integridad mecánica, ser resistente a los choques y poseer un muy bajo coeficiente de lixiviación por el agua. Sin embargo, según el destino que se vaya a dar a los desechos sólidos, no es siempre necesario que satisfagan todos los criterios indicados ni es preciso observar en cada caso los mismos requisitos.

Se han elaborado varios métodos para la solidificación de desechos líquidos de alta actividad, en particular el empleo de lechos fluidificados, lechos agitados, hornos rotatorios, crisoles y cámaras de pulverización [3]. En esencia, todos ellos consisten en la deshidratación y desnitrificación de los desechos, el calentamiento del residuo hasta una temperatura de 400 a 1200°C y la eliminación de la mayoría de los constituyentes volátiles para obtener un sólido calcinado. Sin embargo, la mayoría de los desechos calcinados son moderadamente solubles en el agua y no suele considerarse que constituyan la forma mejor para su almacenamiento o evacuación. En consecuencia, en la mayoría de los casos, se añaden componentes vitrificadores a base de borosilicato o fosfatos, ya sea en la etapa de calcinación o en una segunda etapa del proceso de solidificación, incorporando los productos de fisión y los óxidos actínidos en una masa de vidrio fundido que se deja enfriar para formar un producto vitrificado, cuyo coeficiente de lixiviación es análogo al del vidrio pyrex. Los procesos básicos de vitrificación suelen producir bloques monolíticos de vidrio en contenedores de acero inoxidable. El volumen equivalente a la generación anual de 1000 MW(e) en un LWR está comprendido entre 2 y 4 m³, con un contenido de óxidos en los desechos del 20 al 30%, en función de la carga térmica de radiodesintegración tolerable. Esto a su vez depende de la temperatura en el eje central y en la superficie de los contenedores llenos.

Si bien la solidificación de los desechos líquidos de alta actividad se está investigando desde hace unos 20 años en varios países que trabajan en la reelaboración de combustibles irradiados, únicamente dos de los procesos han alcanzado la etapa de aplicación corriente. La planta de reelaboración química de Idaho (PRQI) aplica normalmente un proceso de calcinación en lecho fluidificado desde hace unos 15 años, y en Marcoule (Francia) funciona a escala industrial una planta de vitrificación que produce vidrio de borosilicato por calcinación en un tambor rotatorio seguida de fusión en un horno (proceso AVM).

Además de la calcinación y la vitrificación básicas, hay otros procesos más modernos en que se fabrican calcinados o cuentas de vidrio que se revisten con carbono pirolítico, carburo de silicio y finas capas metálicas. En otros procesos se incorpora el producto vitrificado o calcinado granular en una amplia variedad de matrices, tales como metales, aleaciones metálicas y grafito. Entre las técnicas estudiadas o en curso de estudio, figuran las reacciones exotérmicas que dan productos de radionucleidos virtualmente insolubles en fase metálica o cerámica, la producción de minerales cristalinos y sintéticos que incorporan los radionucleidos

en redes cristalinas de baja solubilidad, la obtención de calcinados comprimidos y sinterizados, la sorbción en esponjas de zeolita o de materiales arcillosos, seguida de un tratamiento a alta temperatura a fin de obtener un producto cerámico. Si bien muchos de estos procesos dan en último término un desecho sólido mejor que el obtenido por la vitrificación más sencilla, es posible que sean más complicados desde el punto de vista de su aplicación, y en muchos de ellos el desecho sólido final por unidad de electricidad generada posee un volumen mucho mayor.

En la mayoría de los procesos de solidificación a alta temperatura, sean cuales fueren, especialmente en la calcinación y la desnitrificación, se precisa la evaporación y la desnitrificación del desecho líquido para formar un residuo sólido. Esto plantea el problema del tratamiento de los gases residuales. Además del vapor y de los óxidos de nitrógeno, los gases residuales suelen contener algunas sustancias radiactivas y otros radionucleidos volátiles constituidos por partículas finas muy móviles, por ejemplo, el rubenio. El tratamiento de los gases residuales persigue capturar y eliminar sus constituyentes radiactivos y asegurar que su descarga en la atmósfera se halla dentro de límites aceptables.

En una instalación de solidificación de desechos de alta actividad, la mayor parte del equipo de fabricación pertenece al sistema de tratamiento de gases residuales, que puede ser la sección más compleja y sensible de una instalación de este tipo. El sistema de tratamiento suele estar formado por un complejo conjunto de filtros, condensadores, purificadores, fraccionadores e incluso absorbentes de lecho seco montados en serie. La mayoría de los condensados y de las corrientes de lavado son reciclables, mientras que otros pueden eliminarse después de reducir su radiactividad a un nivel aceptable.

ALMACENAMIENTO PROVISIONAL DE DESECHOS SOLIDIFICADOS DE ALTA ACTIVIDAD

Actualmente se están reexaminando los conceptos de evacuación aplicables a los desechos solidificados de alta actividad. La aplicación práctica del concepto o conceptos más adecuados, incluso solo con fines de demostración, puede necesitar aún hasta 10 años o más. Entre tanto, los desechos de alta actividad tendrán que ser almacenables en forma fácilmente recuperable y segura. Además, podrá considerarse conveniente un almacenamiento más prolongado a fin de permitir un enfriamiento mayor (radiodesintegración) y reducir su tasa de generación de calor antes de la evacuación, en particular si se trata de su entierro en un cementerio geológico. Si bien algunos propugnan la evacuación de los desechos de alta actividad inmediatamente después de su solidificación, no obstante se necesitarán ciertos medios de almacenamiento probablemente para el lapso de tiempo entre la solidificación y el transporte a una instalación de evacuación.

Conviene subrayar la diferencia entre almacenamiento y evacuación. El almacenamiento consiste en colocar los desechos en un lugar determinado con la intención de retirarlos más tarde. Por consiguiente, por su situación, diseño y funcionamiento una instalación de almacenamiento debe facilitar el eventual transporte de los desechos a otro lugar.

La evacuación consiste en depositar los desechos en un lugar determinado sin intención de recuperarlos, por lo menos una vez demostrada la eficacia de tal evacuación, cuando los desechos deberán quedar aislados para impedir el acceso fácil a los mismos.

Las instalaciones de almacenamiento estridriadas para los desechos solidificados de alta actividad se dividen en tres categorías: a) estanques de agua, b) bóvedas refrigeradas por aire, y c) cofres o recipientes blindados y refrigerados por aire. Los estanques y las bóvedas pueden estar situados en la superficie, bajo tierra a poca profundidad o en excavaciones profundas. Si bien es evidente que cada una de esas categorías presenta ventajas e inconvenientes, es posible preparar tales lugares de modo que ofrezcan un satisfactorio grado de seguridad.

La selección depende de las condiciones locales y de las preferencias personales. El empleo de cofres o recipientes blindados y refrigerados por aire constituye un almacenamiento en la superficie que requiere mucho mayor espacio que los otros dos sistemas.

La experiencia adquirida con el almacenamiento de elementos combustibles en piscinas o en bóvedas refrigerados por aire es aplicable al de los desechos de alta actividad, siendo las piscinas las instalaciones mejor conocidas. Si bien se han estudiado algunas variantes de cada tipo, la única instalación de almacenamiento que funciona realmente es la bóveda refrigerada por aire de Marcoule destinada al almacenamiento del producto AVM. Se ha comunicado que en la India está en construcción una bóveda de características análogas refrigerada por aire para desechos vitrificados de alta actividad. Igualmente, el producto granulado procedente de un calcinador de desechos en lecho fluidificado de la PTQI se almacena en grandes depósitos (3,7 metros de diámetro por 14 metros de altura) situados en bóvedas refrigeradas por aire. Se trata de un caso especial debido al contenido relativamente bajo de *productos de fisión (tasa de generación de calor) del calcinado*. Teniendo en cuenta que existen numerosas variantes de estos tres tipos básicos de almacenamiento, presentamos a continuación una descripción general de cada uno de ellos:

a) **Piscinas de agua:** En general, aunque no necesariamente, los contenedores de desechos se encierran en envases de acero inoxidable que se almacenan a continuación en piscinas de hormigón revestidas de acero inoxidable y llenas de agua desmineralizada. El agua proporciona un medio refrigerante y un blindaje transparente contra las radiaciones. El calor de desintegración, extraído por circulación del agua, se transfiere a un circuito secundario de refrigeración, donde el calor es eliminado ya sea por torres de enfriamiento, a otra piscina o a otro sumidero de calor. El sistema de refrigeración debe ofrecer redundancia y precisa un suministro suficiente de agua de refrigeración, un funcionamiento y una vigilancia continuos, un control riguroso de la composición química del agua para minimizar la corrosión, en particular en caso de almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, el agua actúa de barrera adicional contra la contaminación si se produce una fuga en el contenedor de desechos y su envase, así como un sumidero de calor en caso de un fallo de corta duración del sistema de refrigeración.

b) **Bóvedas refrigeradas por aire:** Los contenedores de desechos se encierran en envases de acero al carbono que se suspenden en bóvedas de hormigón y se rodean de mangueras de acero o de deflectores para el control direccional del aire de refrigeración. El aire de refrigeración filtrado procedente de un distribuidor inferior se hace pasar en sentido ascendente por el espacio anular, situado entre los envases exteriores y las mangueras de acero, o se distribuye adecuadamente alrededor de los envases exteriores mediante deflectores, siendo recogido en un impelente superior. Después de atravesar un filtro de alta eficacia, el aire caliente se descarga a través de una chimenea. Los descensos de presión y una buena capacidad de refrigeración requieren una circulación forzada de aire. Sin embargo, si no se necesita una refrigeración muy elevada, nada se opone a que la bóveda sea refrigerada mediante una corriente de aire natural. El blindaje contra las radiaciones se obtiene mediante gruesos muros de hormigón o gracias a una ubicación adecuada de la bóveda. Este método exige envases exteriores de alta integridad, una vigilancia continua de la circulación del aire y, cuando se requiera una circulación forzada, un sistema seguro de reserva. Presenta un inconveniente: la posibilidad de una contaminación arrastrada por el aire en caso de un fallo en el contenedor de desechos o en el envase exterior.

c) **Cofres blindados y refrigerados por aire:** Uno o varios contenedores de desechos se encierran dentro de un cofre de acero. El cofre va rodeado por un blindaje anular de hormigón contra rayos gamma-neutrones, con un espacio de aire entre ambos, y se transporta a una zona de almacenamiento al aire libre donde se monta verticalmente sobre una plataforma de hormigón, de modo que el calor es disipado mediante una corriente de aire por

convección natural que pasa por el espacio anular entre el cofre de acero y el blindaje de hormigón. Este método es atractivo debido a su flexibilidad ya que es posible modificar las instalaciones para ajustarlas a la naturaleza de los desechos, a las dimensiones de los contenedores y a su número. El sistema está prácticamente a prueba de daños debido al blindaje masivo de hormigón y requiere un mínimo de operaciones y de vigilancia, pero lo mismo que los restantes métodos de almacenamiento, exige una vigilancia continua para la detección de cualquier escape de radionucleidos. Los cofres o los blindajes de hormigón defectuosos pueden identificarse rápidamente para su reparación o sustitución. Como se ha dicho, una desventaja es que necesita grandes superficies, de un orden de magnitud mayor que en el caso de los otros dos sistemas.

La selección de un método adecuado para una instalación de almacenamiento de desechos sólidos de alta actividad depende del emplazamiento, de las condiciones ambientales, del costo y de la fiabilidad continua de los materiales. Otra consideración evidente es el tiempo de almacenamiento provisional estimado o el tiempo que se utilizará la instalación. Se ha estimado que el costo total de construcción y utilización de una instalación técnica de almacenamiento, inclusive la vigilancia durante 100 años después del último depósito de desechos, es comparable en el caso de los dos sistemas de refrigeración por aire, pero aproximadamente el 50% más elevado en el de las piscinas de agua, debido a los gastos adicionales de electricidad, agua, etc., y a la necesidad de más personal. Con la tecnología y los materiales técnicos disponibles normalmente debería ser posible conseguir una instalación y un sistema de almacenamiento que funcione adecuadamente durante 100 años como mínimo, de ser necesario. Sin embargo, se cree que se dispondrá de sistemas eficaces de evacuación de desechos de alta actividad dentro de los próximos 30 años, y probablemente antes de fines de siglo. Por otra parte, como se ha mencionado ya, quizá presente ventajas técnicas y económicas almacenamiento prolongado provisional, durante cuyo período pierdan gravedad algunos de los problemas que plantean la disipación del calor, la temperatura de los desechos y otros efectos en un cementerio de desechos.

EVACUACION DE DESECHOS DE ALTA ACTIVIDAD

La evacuación de desechos nucleares de alta actividad, en particular de radionucleidos transuránicos de período muy largo, es en la actualidad una de las cuestiones que más interesan a la opinión pública. A mi juicio, es tema difícil de resumir o de discutir, ya que parece despertar desproporcionadas pasiones. La razón primordial de que hoy día no exista un método de evacuación de desechos de alta actividad es que no ha habido mayor necesidad del mismo, como probablemente tampoco la habrá durante otro decenio, aproximadamente. Sin embargo, muchas personas insisten en que una de las condiciones de aceptación de la energía nucleoelectrica es la existencia de un método seguro y demostrado de evacuación de estos desechos nucleares.

Debido a su accesibilidad, el depósito de desechos radiactivos en instalaciones técnicas o en el suelo a poca profundidad puede considerarse esencialmente un modo provisional de almacenamiento y no una evacuación propiamente dicha. Para un aislamiento más perfecto, tanto respecto del hombre como de su medio ambiente, se han propuesto varios sistemas de evacuación para los desechos de alta actividad que contienen elementos transuránicos [4]. Fundamentalmente se clasifican como sigue:

- a) Evacuación terrestre (en la tierra)
 - i) en formaciones geológicas profundas en zonas terrestres, [5, 6] o bajo el fondo de los océanos
 - ii) en el fondo de los océanos
 - iii) en zonas cubiertas con glaciares

- b) En el espacio extraterrestre
- c) Por transmutación nuclear

Todos los sistemas de evacuación de desechos radiactivos en la tierra tienen por objeto aislar estos desechos o sus radionucleidos de la biosfera de modo que el hombre u otras especies biológicas no queden expuestos a niveles inaceptables de radiación. Este objetivo puede alcanzarse por medio de una contención con un grado suficiente de fiabilidad durante el período de tiempo requerido o consiguiendo una retención o un mecanismo de retardo adecuados y disponiendo de un medio de dispersión para diluir a niveles aceptables los radionucleidos que puedan llegar a la biosfera.

Se estima generalmente que la evacuación en un medio ambiente terrestre sería la menos peligrosa en el caso de los desechos sólidos de alta actividad resistentes a la lixiviación. Sin embargo, la Unión Soviética ha demostrado las posibilidades de inyectar desechos líquidos de alta actividad directamente en estratos acuíferos porosos, de aislamiento apropiado, aunque actualmente lleva a cabo un programa muy dinámico encaminado a desarrollar la tecnología de la evacuación de desechos vitrificados en un cementerio geológico. Mis observaciones se refieren solamente a la evacuación de desechos solidificados de alta actividad.

Afortunadamente, los riesgos que entraña una fuerte radiactiva, a diferencia de lo que ocurre con muchos elementos peligrosos no radiactivos, por ejemplo, el mercurio, el cadmio y el plomo, disminuyen con el tiempo. El aislamiento o el tiempo de confinamiento necesarios para los radionucleidos depende de sus respectivas concentraciones iniciales y de sus respectivos períodos de semidesintegración para que la concentración alcance niveles aceptables. Una regla empírica para estimar el tiempo necesario para que una elevada concentración de un radionucleido en una fuente radiactiva fija alcance un nivel no peligroso es el de 20 veces dicho período.

La determinación del plazo durante el que debe mantenerse la integridad del aislamiento de desechos de alta actividad se ha basado en las concentraciones relativas de los productos de fisión radiactivos y de los restantes actínidos en dichos desechos. Existe un supuesto *tácito* según el cual el cesio-137 y el estroncio-90, cada uno con un período aproximado de 30 años, son los productos de fisión determinantes, mientras que el plutonio-239, con un período de unos 25 000 años, es el actínido determinante. En consecuencia, el plazo de aislamiento deseable es de unos 1000 años aproximadamente para los productos de fisión y del orden de 100 000 años para los actínidos transuránicos contenidos en los desechos de alta actividad. Si bien las proyecciones relativas al aislamiento durante este último plazo puedan parecer algo fuera de lo real, dentro de tal período cabe predecir con cierta exactitud sucesos geológicos de producción probable en muchos emplazamientos.

El requisito básico para que una formación geológica cualquiera sirva de cementerio para la evacuación de desechos radiactivos es su capacidad de contener los radionucleidos y aislarlos de la biosfera hasta que se hayan desintegrado y alcanzado un nivel no peligroso. La acción de las aguas subterráneas es el proceso natural predominante capaz de transportar los radionucleidos de los desechos desde un cementerio profundo cuidadosamente seleccionado hasta la biosfera. Por tanto, un factor muy importante a considerar para el aislamiento de los desechos es su protección respecto de las aguas subterráneas en circulación. Por consiguiente, una formación geológica seca, debe facilitar amplia protección mientras conserve tal característica. La integridad de una formación geológica contra las aguas subterráneas circulantes puede mejorarse mediante barreras geológicas circundantes. Otros factores pueden contribuir también al satisfactorio confinamiento de los radionucleidos, y entonces no será necesario ubicar el cementerio en una formación completamente seca, siempre que la velocidad de migración de las aguas subterráneas desde esa formación sea despreciable o extremadamente baja a largas distancias.

Esos otros factores son:

- La forma de los desechos, es decir, un producto relativamente insoluble
- Un contenedor de elevada integridad
- La composición química de las aguas subterráneas
- La integridad de las barreras geológicas circundantes contra la migración de las aguas subterráneas.
- La retardación de la migración de los radionucleidos desde la zona de evacuación a los estratos geológicos circundantes debida a diversos procesos, por ejemplo, intercambio iónico, filtración, absorción superficial y precipitación. La magnitud del efecto de retardación variará considerablemente según la naturaleza de la formación o de los estratos geológicos y de los radionucleidos. Será útil estudiarla detenidamente antes de decidir su importancia como factor de seguridad.
- Mecanismos artificiales y/o dispositivos técnicos para retardar la velocidad de migración de las aguas subterráneas y de disolución de los desechos.

La naturaleza independiente de cada uno de esos factores pone de manifiesto la gran medida de redundancia que puede incorporarse a los sistemas encaminados a aislar los desechos en una formación geológica.

Los mantos potentes o las intrusiones diapíricas de **sal de roca** suelen considerarse normalmente uno de los medios geológicos más prometedores para la evacuación de desechos de alta actividad y de desechos contaminados sobre todo por elementos transuránicos de período muy largo. Esto obedece sobre todo a los considerables estudios realizados en los Estados Unidos y en la República Federal de Alemania. Las principales ventajas de utilizar sal de roca como medio para la evacuación de desechos son la facilidad de abrir galerías, su muy bajo contenido de agua, sus propiedades térmicas relativamente buenas y sus características plásticas que permiten cerrar las penetraciones artificiales o cualquier dislocación que pueda ocurrir. Las desventajas son que la sal de roca es soluble en agua, decrepita a temperaturas no muy altas y es bastante corrosiva para la mayoría de los metales.

En algunos países se están investigando ciertas **formaciones arcillosas** de elevada plasticidad. La plasticidad de las arcillas es aproximadamente proporcional a su contenido de agua. Para que sean lo suficientemente plásticas las arcillas deben contener probablemente de 15 a 20% de agua que, sin embargo, se mueve a una velocidad extremadamente baja o nula. Si bien las arcillas poseen una conductividad térmica mucho más baja que la sal de roca y pueden ser de difícil excavación (minería), por otra parte presentan ciertas ventajas, por ejemplo, elevada capacidad de sorción, insolubilidad y muy baja corrosión de los contenedores de desechos.

También se efectúan investigaciones con respecto a la posibilidad de utilizar como cementerios de desechos radiactivos las rocas **crystalinas o las denominadas rocas "duras"**, en particular granito, basalto, calizas y rocas metamórficas. Estas rocas son impermeables cuando son masivas, pero con frecuencia están entrecortadas por una red de grietas o fracturas susceptibles de permitir el paso de grandes volúmenes de agua subterránea. Sin embargo, hay formaciones de rocas duras totalmente o casi impermeables, por lo general resultantes de especiales condiciones geológicas, tales como la obturación secundaria (depósito mineral) de las fracturas o el aislamiento con respecto a acuíferos por otras formaciones impermeables. Incluso si la dislocación provocase eventualmente un contacto limitado entre los desechos y las aguas subterráneas, este fenómeno no supondría necesariamente una fuerte disminución del aislamiento debido a que pueden actuar como factores adicionales los contenedores la forma de los desechos y la migración retardada de los radionucleidos a través de los estratos circundantes.

El examen de las ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de formaciones geológicas, incluidos sus estratos circundantes, para su utilización como cementerios de desechos radiactivos puede resultar interminable. Lo interesante sería disponer de distintos emplazamientos adecuados para la evacuación de desechos en rocas profundas.

La evacuación en formaciones geológicas en el subsuelo oceánico no es conceptualmente diferente de la evacuación en formaciones geológicas subterráneas. La diferencia esencial estriba en la tecnología utilizada para la evacuación de desechos y en la dificultad de su recuperación, en caso de que ésta fuese necesaria. Si bien existe una tecnología para las operaciones subterráneas, los detalles relativos a la evacuación en el subsuelo oceánico son todavía teóricos, aunque ya se realizan actividades análogas en la exploración submarina. Sin embargo, la evacuación de desechos en formaciones situadas en el subsuelo oceánico posee las ventajas inherentes al alejamiento con respecto a las actividades previsibles del hombre, a la elevada capacidad de intercambio iónico de los sedimentos suprayacentes y a la enorme dilución de los radionucleidos que pudieran escapar.

Algunos especialistas han propuesto la evacuación de desechos de alta actividad cuidadosamente a condicionados, incluidos los transuránicos, en los fondos oceánicos. La viabilidad técnica de este método depende de la capacidad de producir matrices sólidas y/o contenedores que procuren el aislamiento seguro a largo plazo que es necesario. Una característica interesante de este sistema es la posibilidad de refrigeración por el medio acuoso circundante.

Se han propuesto varios procedimientos para la evacuación de desechos en capas de hielo continentales, especialmente en el casquete glacial antártico que al parecer existe desde hace varios millones de años. Se supone que los contenedores de desechos calientes fundirían el hielo y llegarían hasta la superficie de contacto hielo-roca, cerrándose herméticamente el orificio al volverse a helar la masa fundida detrás de ellos. La seguridad de la contención podría mejorarse introduciendo los desechos en el lecho de rocas subyacentes a la capa de hielo, lo que en cierto modo constituiría una evacuación en una formación geológica. Actualmente se manifiesta escaso interés por el posible uso de las zonas glaciares debido a la movilidad de las capas de hielo, al conocimiento defectuoso de los procesos climáticos a largo plazo y a la mayor accesibilidad de las formaciones geológicas no glaciares.

La evacuación de los desechos de alta actividad en el espacio extraterrestre brindaría el aislamiento más completo con respecto al medio ambiente humano. Sin embargo, el costo de la energía de lanzamiento limita actualmente este método a pequeños volúmenes. Otros motivos de preocupación son la fiabilidad del lanzamiento y las consecuencias resultantes de la reentrada en la atmósfera de las cápsulas con desechos.

Algunos autores consideran la transmutación nuclear como la solución ideal, en principio, del problema de la evacuación de radionucleidos de largo período contenidos en los desechos de alta actividad. Supone su transformación en nucleidos de período mucho más corto o incluso estables. La transmutación de los productos de fisión de largo período no se considera factible por medio de las tecnologías conocidas o previsibles, aunque podría ser posible la transmutación de los actínidos transuránicos. Una idea interesante es separar los emisores alfa transuránicos (actínidos), de período muy largo, del grueso de los desechos, en particular de los desechos de alta actividad. Los restantes materiales contaminados por productos de fisión necesitarían ser aislados únicamente hasta unos 1000 años. Sin los productos de fisión generadores de altas temperaturas, los elementos transuránicos generadores de bajas temperaturas podrían evacuarse de un modo más adecuado o reciclarse en reactores nucleares para su quemado (transmutación) y transformación en productos de fisión de período más corto o en elementos estables.

Si bien es técnicamente factible separar de los desechos de alta actividad los elementos transuránicos hasta concentraciones despreciables, es necesario evaluar desde un punto de vista biológico algunos productos de fisión de período muy largo que no han sido separados. Además, los refinados de alta actividad procedentes de la reelaboración del combustible representan menos de la mitad de los elementos transuránicos en los desechos del ciclo de combustible nuclear, y probablemente representarían una cifra mucho menor si los citados elementos se reciclan para su quemado en reactores. Existen actualmente considerables incertidumbres acerca de las ventajas de hacer circular una carga de elementos transuránicos en el ciclo de combustible nuclear.

La evacuación de desechos de alta actividad en formaciones geológicas hoy día parece ser el único sistema factible dada la actual tecnología, conservándose durante un período inicial la posibilidad de recubar los desechos si ello fuera necesario [7]. Probablemente la principal incertidumbre se refiere al efecto de la temperatura de los desechos de alta actividad sobre el entorno del cementerio. Desde luego es posible modificar este efecto concentrando en los desechos los productos de fisión termogeneradores, dejando transcurrir un tiempo suficiente antes de la evacuación y optimizando el número de contenedores por unidad de superficie.

ELEMENTOS COMBUSTIBLES IRRADIADOS

Ultimamente se ha prestado gran atención a la posibilidad de evacuar los elementos combustibles irradiados como desechos en lugar de reelaborarlos para recuperar y reciclar su material fisionable y fértil (plutonio y uranio no quemado). El que esta evacuación de un recurso nacional potencial llegue a efectuarse es cosa bastante hipotética, por lo menos hasta tener la seguridad de que se dispondrá de fuentes energéticas aceptables en sustitución de la

Cuadro 1. Comparación de la energía térmica y la radiactividad del combustible agotado (CA) y de los desechos de alta actividad (DAA)

Tiempo transcurrido desde la descarga del combustible agotado, (en años)	Energía térmica (wattios/TMMP)*		Radiactividad (Ci/TMMP)*	
	CA	DAA	CA	DAA
10	1200	1000	410 000	320 000
100	290	110	42 000	35 000
1000	55	3,3	1 800	130
10 000	14	0,47	480	42
100 000	1,1	0,11	58	21
1 000 000	0,39	0,15	21	10

* TMMP significa toneladas métricas de metal pesado cargado originalmente en el reactor.

Cuadro 2. Naturaleza de los desechos líquidos radiactivos procedentes de distintos tipos de reactor

Tipo de reactor	Combustible				Características de la solución de desechos que penetra en el evaporador				Características iniciales del concentrado a almacenar			
	Tipo de combustible	Tipo de vaina	Grado de quemado típico MWd/T	Tiempo mínimo de enfriamiento antes de la reelaboración T	Volumen l/t de metal pesado	Actividad en el tiempo T Ci/l	Capacidad calorífica en el tiempo T W/l	Factor de concentración posible	Volumen (después de la evaporación) l/t	Actividad en el tiempo T Ci/l	Capacidad calorífica en el tiempo T W/l	Acidez Normalidad
LWR (Estados Unidos)	UO ₂	Zircaloy 2 o 4	29 000*	3y*	5 200	150	0,6	14	380		8,3	4-7
LWR (Francia)	UO ₂	Zr	33 000	1y	9 800	230	0,93	20	540	4 100	18,5	2,5
LWR (Reino Unido)	UO ₂	Zircaloy	33 000	150d	6 250	860	3,2	16,5	400		5,3	0,5-1,0
LWR (India)	UO ₂	Zircaloy	15 000	150d	7 200	300	9,0	9	800	3 000	0,9	2-3
LWR (Japón)	UO ₂	Zircaloy	28 000	180d	5 500	210	0,59	16	350	3 100	9,3	2,5
VVR (Unión Soviética)	UO ₂	Zr	28 000	3y	5 500	60	0,27	13	420	730	3,3	4-6
Refrigerado por gas (Francia)	U-Mo	Mg	3 000	1y	7 600	70	0,24	70	110	4 800	17	0,8
Refrigerado por gas (Francia)	U/Si/Al	Mg	5 000	1y	5 400	100	0,34	50	100	5 400	18	2,5
Magnox	U (Nat)	Magnox	1 300 3 500	125d	4 500	460	0,25	50 100	90 45		12	3
AGR	UO ₂	S.S.	37 000 18 000	1y	5 000	600	0,33	20	100		16	
Candu ETGR	no existen planes para la reelaboración											
	UC ₂ /ThC ₂	Graphite, SiC	100 000	180d	5 700	1 700	7,5		3 600			
PPR	(U,Pu)O ₂	S.S.	60 000	180d	9 100	900 (A) 1 200 (B)	4 (A) 5 (B)	2,5	3 600		10 (C) 12 (C)	3
MTR	U-Al	Al	200 000	~ 1y	400 000	200	0,8	1,3	300 000		1	1

* Valores de equilibrio probable para los Estados Unidos (Actualmente no se reelabora el combustible nuclear de tipo comercial)

Notas (A) primer ciclo, valor medio del núcleo y de la zona fértil
 (B) sexto ciclo, valor medio del núcleo y de la zona fértil
 (C) suponiendo la evaporación inmediata (en la práctica, la evaporación se demorará)

Siglas: LWR Reactor de agua ligera
 VVR Reactor refrigerado y moderado por agua
 AGR Reactor de gas avanzado
 ETGR Reactor de gas a alta temperatura
 PPR Reactor prototipo rápido
 MTR Reactor de prueba de materiales

fisión nuclear. Sin embargo, cuenta habida de las actuales tendencias de la opinión pública convendría considerar la evacuación como desechos de los elementos combustibles irradiados. Además de los productos de fisión y de los elementos transplutónicos que constituyen normalmente los desechos de alta actividad, los elementos combustibles irradiados contienen aproximadamente 99 veces más plutonio y uranio que los desechos equivalentes de alta actividad resultantes de su reelaboración. Igualmente, el volumen de los elementos combustibles irradiados a evacuar es de 7 a 10 veces mayor.

Lo dicho con respecto al almacenamiento y evacuación de desechos solidificados de alta actividad es aplicable también al almacenamiento y evacuación de elementos combustibles irradiados. Como se ha mencionado, los tipos de almacenamiento propuestos para los desechos solidificados de alta actividad se han obtenido por extrapolación a partir de la tecnología, experiencia y conceptos de almacenamiento de combustibles nucleares irradiados, es decir, piscinas, bóvedas o cámaras refrigeradas por aire y recipientes individuales también refrigerados por aire. Es casi seguro que los combustibles nucleares irradiados, si están envasados adecuadamente, pueden almacenarse durante largos períodos sometidos a vigilancia, siendo probablemente preferible la utilización de instalaciones refrigeradas por aire cuando los combustibles se han enfriado lo suficientemente.

Si bien es técnicamente razonable evacuar los combustibles irradiados o los que han sido envasados directamente en una formación geológica confiando en la contención que la misma ofrece, es discutible, desde el punto de vista de la gestión de desechos, que esta solución llegue a ser algún día aceptable ya que no reduce los riesgos en la medida posible. En primer lugar, hay que reconocer que los combustibles nucleares se fabrican corrientemente para su rendimiento óptimo en un reactor y no para satisfacer los criterios de evacuación. Además, los elementos combustibles encierran productos gaseosos de fisión a considerable presión y se deben tener en cuenta las consecuencias radiológicas de su escape, ya sea durante la manipulación de estos elementos combustibles o ya en el medio de evacuación, por lo menos hasta que su concentración haya disminuido por desintegración radiactiva a un nivel biológicamente aceptable. Por otra parte, existe la posibilidad de confinar y evacuar los elementos combustibles en cajas o recipientes de diseño adecuado que conservarán probablemente su integridad durante los 100 000 años, período en que su contenido sigue siendo peligroso. En realidad, el plutonio contenido en los combustibles irradiados se extiende considerablemente este período. A la larga, tal vez sea conveniente desgasificar y transformar combustibles irradiados para su evacuación, por ejemplo, mediante trituración o troceado y su inserción en matrices relativamente insolubles. Las técnicas apropiadas para la evacuación de elementos combustibles irradiados no han sido estudiadas detenidamente, ni los especialistas han llegado a un acuerdo sobre ellas.

OTROS DESECHOS DE ALTA ACTIVIDAD

La figura 1 señala como posibles desechos de alta actividad los componentes de un reactor altamente irradiados y los productos de fisión concentrados. Su consideración no necesita detenernos mucho tiempo.

Los componentes de reactor altamente irradiados pueden considerarse como desechos de alta actividad debido a su radiactividad inducida. En principio requieren un fuerte blindaje para la protección contra las radiaciones, pero en general para la refrigeración basta el aire ambiental. Los principales radionucleidos termogeneradores no son de período relativamente largo y con el tiempo se desintegran hasta un nivel que puede exigir precauciones pero no plantear problemas para la evacuación *subterránea*, o de otro tipo de estos componentes. La actual técnica de manipulación de estos componentes radiológicamente calientes consiste en almacenarlos en una zona fuertemente blindada y ventilada durante un período adecuado de

enfriamiento, por lo menos hasta que la velocidad de generación de calor deje de plantear dificultades durante los preparativos para su evacuación y después de ésta.

Los productos de fisión o concentrados de actínidos resultan de la separación por diversas razones de determinadas fracciones de productos de fisión o de actínidos de las corrientes de reelaboración de combustible o de la corriente de desechos de alta actividad. Pueden estar constituidos también por sedimentos del concentrador o evaporador resultantes de la evaporación y concentración de corrientes de desechos líquidos de actividad media. A menos que se requieran para algún fin útil, estos concentrados líquidos pueden almacenarse en tanques de desechos líquidos de alta actividad. En este caso, es necesario cerciorarse de que dichas corrientes de desechos, en particular los sedimentos del evaporador, no poseen algún componente incompatible con el proceso de solidificación proyectado. Puede ser necesario o conveniente solidificar estos desechos líquidos de alta actividad mediante un proceso independiente.

Este artículo es una adaptación de una conferencia pronunciada por el Sr. Lennemann durante un curso de capacitación del OIEA sobre "Planificación y ejecución de proyectos nucleoelectrónicos", celebrado en Karlsruhe, República Federal de Alemania, del 4 de septiembre al 24 de noviembre de 1978.

Referencias

- [1] "Standardization of Radioactive Waste Categories", Colección de Informes Técnicos N° 101, OIEA, Viena (1970).
- [2] "Progress Report on the Results of the Inquiry on Classification of Radioactive Wastes", Documento de Trabajo RWM (77)1, septiembre de 1977, Radioactive Waste Management Committee, AEN/OCDE, París.
- [3] "Techniques for Solidification of High-level Wastes", Colección de Informes Técnicos N° 176, OIEA, Viena (1977).
- [4] "Mesa Redonda 3.1. "Solid High-level and Long-lived (Alpha-contaminated) Radioactive Waste Disposal Options and Their Availability", Tirada a parte de " Nuclear Power and Its Fuel Cycle", Vol.4, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena (1977).
- [5] "Site Selection Factors for Repositories of Solid High-level and Alpha-bearing Wastes in Geological Formations", Colección de Informes Técnicos N° 177, OIEA, Viena (1977).
- [6] "International Aspects in Geological Disposal of Nuclear Waste", D. Richter y Wm. L. Lennemann, Proceedings of the First International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns (Rockstore 77) Estocolmo, Sept. de 1977 (Pergamon Press).
- [7] "Storage and Disposal of High-level and Alpha-bearing Wastes", resumen de " Management of Radioactive Wastes", Wm. L. Lennemann, H.E. Parker y P.J. West, memoria presentada en la Conferencia Nuclear Europea, París, abril de 1975.