

Un punto de vista del Reino Unido sobre la gestión de desechos de alto nivel

por W. Marshall*

En los últimos años los desechos nucleares, en particular los desechos de más alta actividad o de "alto nivel", han atraído grandemente la atención general. Estos desechos han despertado el interés del público como algo excepcional, sin duda alguna porque se ha dicho que contienen elementos cuya radiactividad tardará centenares de miles o incluso millones de años en desintegrarse. Además, los adversarios del uso de la energía nucleoelectrónica repiten periódicamente que la industria nuclear ha sido incapaz de hallar una solución al problema del destino de esos desechos y que es notorio que unos 20 años después de la entrada en funcionamiento de las primeras centrales nucleares los hombres de ciencia siguen discutiendo si hay que almacenar o evacuar los desechos, y en este último caso en qué tipo de rocas. La gente interpreta las declaraciones de los investigadores de que es necesario efectuar nuevas investigaciones como indicación que realmente no saben qué hacer con esos desechos.

La confusión del público sobre estas cuestiones se ha visto agravada en el Reino Unido por lo que puede considerarse como un cambio de la política gubernamental en relación con el programa de sondeos geológicos. Dicho programa tenía por finalidad obtener datos acerca de las condiciones reinantes en un cementerio de desechos de alto nivel en capas geológicas profundas. Se produjo una fuerte oposición local a las solicitudes de permiso para efectuar perforaciones en determinados emplazamientos, pero los científicos adujeron la importancia del programa de sondeos para demostrar un método satisfactorio de evacuación definitiva de los desechos. Después se anunció que el Gobierno había revisado el programa geológico decidiendo que no se precisaban más perforaciones. Es muy natural que el público se sienta desorientado.

Para aclarar estos problemas conviene empezar considerando la principal fuente de desechos de alto nivel, a saber, el combustible irradiado en las centrales nucleares, el cual contiene uranio y plutonio sin quemar —que son potencialmente valiosos materiales combustible—, productos de fisión y actínidos de desecho, todos altamente radiactivos. Después de un período de almacenamiento, para que su radiactividad decaiga hasta un nivel que permita su manipulación más fácil el combustible irradiado es reelaborado. Esta operación consiste en separar los materiales útiles —el uranio y el plutonio— de los desechos. Los desechos restantes tras esta operación son líquidos que después de ser concentrados para reducir su volumen se almacenan en esta forma. Como la radiactividad es aún suficiente para generar una considerable

cantidad de calor, los tanques de almacenamiento se refrigeran por circulación de agua.

Aunque de este modo un almacenamiento seguro es fácil en términos técnicos y perfectamente aceptable a corto plazo, a la larga es más sencillo, seguro y económico almacenar materiales sólidos y no líquidos. Por consiguiente, desde los primerísimos días de la reelaboración se reconoció que sería lógico transformar los desechos líquidos en bloques sólidos para su almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, no había ninguna necesidad urgente de hacerlo. La cantidad de desechos producidos era pequeña; por ejemplo, los 1000 m³ aproximadamente de desechos de alto nivel almacenados actualmente en Windscale representan casi todos los desechos acumulados como resultado del programa nuclear del Reino Unido durante los últimos 30 años. Sin embargo, como la transformación en sólidos era la siguiente etapa lógica, se han efectuado numerosas investigaciones científicas y tecnológicas para dar a solidificar estos desechos.

El sólido escogido para "fijar" estos desechos debe poseer diversas propiedades:

- buena capacidad de aceptar todos los elementos contenidos en los desechos
- buena resistencia a la lixiviación por el agua
- buena resistencia a los daños radioinducidos
- alta conductividad térmica para disipar el calor producido por la desintegración radiactiva.

El vidrio es el material más prometedor no solo porque posee muchas de las propiedades requeridas sino además porque la tecnología de su fabricación está bien desarrollada. Por ello el Reino Unido ha decidido construir una planta de vitrificación basada en el proceso AVM utilizado en el taller de vitrificación de Marcoule (Francia) que ha demostrado ser enteramente satisfactorio. Se han sugerido otros materiales distintos del vidrio —por ejemplo, los óxidos cerámicos—, y el profesor Ringwood (Australia) ha propuesto un material cristalino de roca artificial que ha bautizado con el nombre de *Synroc*.

Una vez que los desechos de alto nivel se han transformado en un sólido, pueden almacenarse en la superficie siempre que nos preocupemos de ejercer la muy reducida vigilancia requerida. La tasa de generación de calor de los bloques de vidrio disminuye muy rápidamente en los primeros años de vida de los desechos. La Figura indica la potencia térmica de un bloque de 0,4 t que contiene una fuerte carga de desechos. Estos bloques pueden blindarse con hormigón, para atenuar la radiación de energía procedente de la desintegración nuclear, y colocarse en un sencillo almacén en medio seco refrigerado por una corriente de aire. Un almacén de tal índole es de dimensiones modestas y requiere un mínimo de cuidados.

* Presidente de la Comisión de Energía Atómica del Reino Unido (11 Charles II St., Londres SW1 4 QP) y miembro del Comité Consultivo Científico del OIEA.

Almacenamiento de desechos antes de su enterramiento

Aunque el almacenamiento superficial no presente dificultades técnicas y aisle los desechos de elevado nivel del medio ambiente en la medida deseada, es posible que más adelante haya razones de orden social o político de peso para preferir la evacuación. Por evacuación entendemos la colocación de los desechos en un emplazamiento y de que no serán ya nunca extraídos y sin que sea necesario ejercer vigilancia durante un largo período. Se han sugerido varias posibilidades. Una que parece particularmente interesante y que ha sido objeto de considerables investigaciones en el Reino Unido y en otros países consiste en aislar los desechos solidificados en formaciones geológicas profundas.

El enterramiento de los bloques de desechos terminaría por exponerlos, en el curso de largos períodos de tiempo, a la acción de las aguas subterráneas; por consiguiente, este tipo de evacuación encierra el riesgo potencial de su transferencia al medio humano. No obstante, si se elige un emplazamiento en el cual las corrientes subterráneas de agua sean mínimas y se construyan además las barreras que describimos más adelante, se puede reducir este riesgo a un valor despreciable. Otro factor a considerar es que durante los primeros años de vida de un bloque, el enterramiento podría provocar un aumento local de la temperatura capaz de incrementar la solubilidad de los desechos y la velocidad local de movimiento del agua. Si queremos evacuar los desechos no mucho después de producidos convendría cerciorarse de que la acumulación de calor no será excesiva. Habrá que prever una refrigeración forzada durante algunos decenios hasta que la

desintegración radiactiva haya alcanzado un punto en que tal refrigeración ya no sea necesaria, o fabricar bloques más pequeños para enterrarlos lo suficientemente separados en las formaciones rocosas a fin de disipar el calor por conducción natural.

Ambas soluciones serían técnicamente factibles complicadas. Poseen también inconvenientes económicos y técnicos frente al método de dejar que los desechos se enfríen durante un período más largo en la superficie o cerca de la misma antes de evacuarlos con carácter definitivo. Hoy día se conviene en general en el Reino Unido en que se debe almacenar los desechos vitrificados hasta que el calor que produzcan haya disminuido a un punto que permita realizar una evacuación segura. El tiempo de almacenaje debería decidirse en función de factores económicos y técnicos, pero puede tratarse de un período de 50 a 100 años o posiblemente mucho más largo.

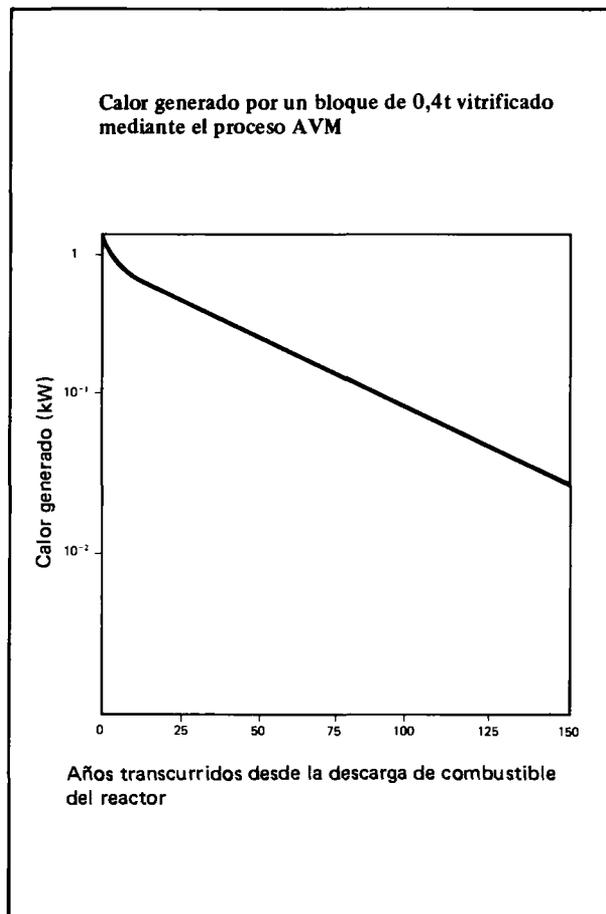
Por consiguiente, el procedimiento que seguimos en el Reino Unido para la gestión de desechos de alto nivel es el siguiente:

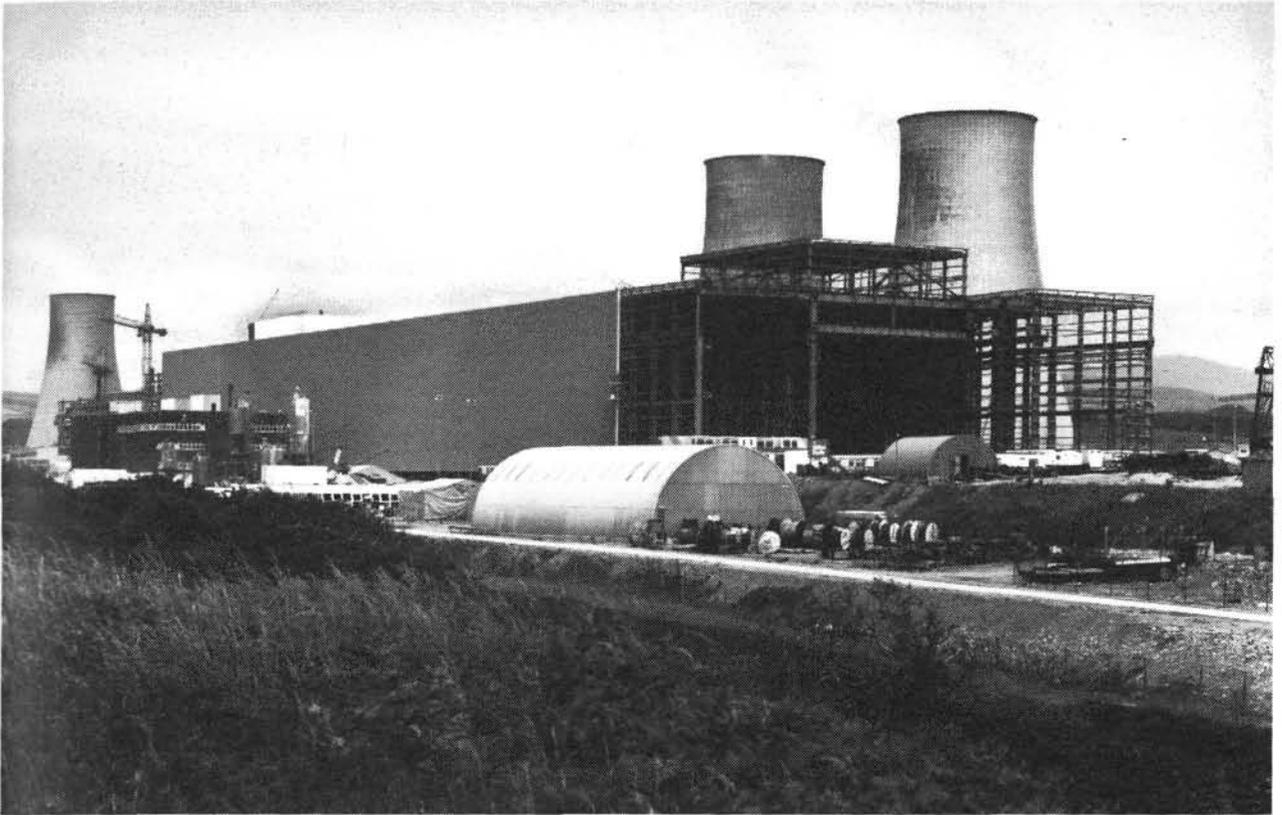
- Solidificación de los desechos en bloques de vidrio
- Almacenamiento de estos bloques hasta que se han enfriado suficientemente, tal vez de 50 a 100 años y quizá más
- Evacuación de los bloques, posiblemente en formaciones geológicas profundas, una vez que el calor producido ha disminuido hasta un nivel aceptable.

Otras opciones de evacuación comprenden la deposición en el fondo de los océanos o el enterramiento bajo los mismos sin embargo, nuestros conocimientos sobre estos métodos son todavía más rudimentarios que los relativos a la evacuación geológica.

A mi juicio, este procedimiento es totalmente lógico y racional. No obstante, puede ser objeto de crítica ya que, la seguridad de la etapa final —la etapa de evacuación— no ha sido demostrada hasta ahora. “¿Como es posible?” —diran los críticos— “¿aplicar un método de evacuación a largo plazo de desechos de alto nivel si no se puede demostrar que la fase final del mismo es segura: segura aplicando como criterio una escala de tiempo virtualmente infinita?” Este argumento se adujo en el Reino Unido en el Sexto informe de la Comisión Real sobre Contaminación del Medio Ambiente, publicado en 1976, que recomendaba que no se estableciese en firme un programa nucleoelectrico importante hasta haberse demostrado, sin ninguna duda razonable, la existencia de un método para garantizar la contención segura de desechos de alta actividad y largo período durante un tiempo ilimitado. Con objeto de soslayar este tipo de críticas, varios países, entre ellos el Reino Unido, empezaron a mediados de los años 70 programas de investigación sobre la viabilidad de métodos posibles de evacuación geológica. El programa del Reino Unido, a cargo del Departamento del Medio Ambiente, forma parte de un programa más amplio de la Comisión de las Comunidades Europeas.

No tengo la menor duda de que los desechos vitrificados pueden evacuarse en formaciones geológicas profundas en condiciones totalmente seguras y de que la cantidad de radiactividad que eventualmente —después de muchos miles de años— volverá al medio humano será tan pequeña que puede despreciarse. Cabe subrayar aquí





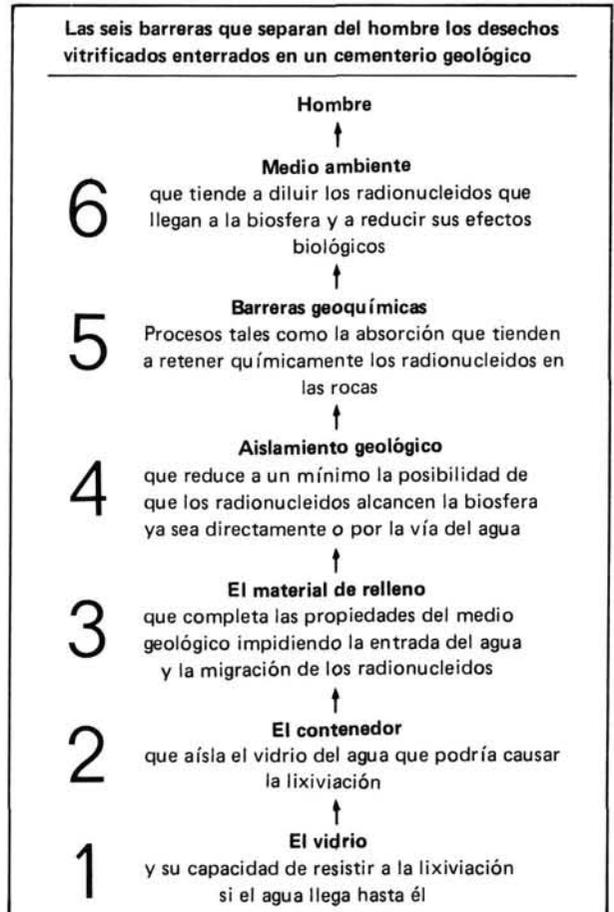
La nueva instalación de recepción y almacenamiento del combustible irradiado Magnox (estanque 5) en construcción en el emplazamiento de la British Nuclear Fuels Ltd. Sellafield (Windscale), Cumbria (Inglaterra). El combustible irradiado Magnox será objeto de almacenamiento subacuático antes de su reelaboración.

que ese nivel de radiactividad después de unos miles de años será inferior al nivel del mineral original del que se obtuvo el combustible. Pero, además, las razones básicas que me inducen a creer en la seguridad de esta forma de evacuación estriban en las varias barreras que pueden crearse para impedir que el desecho vuelva a nuestro medio ambiente. Sin embargo, no es suficiente que esté yo convencido: las pruebas tienen que presentarse y someterse a un examen científico y crítico y, cuando existe motivo razonable de duda, a experimentos. Consideremos, por consiguiente, esas barreras y las investigaciones complementarias que podrían efectuarse para realzar la confianza en su efectividad.

Seis barreras

Una vez que el desecho vitrificado ha sido colocado en el cementerio definitivo queda aislado del medio humano por seis barreras, como se indica en el recuadro.

Primera: el desecho se fija en el vidrio en una forma altamente estable e insoluble. Desde luego, se producirá inevitablemente alguna lixiviación del vidrio y de los elementos radiactivos que contiene si en un futuro distante el agua se pone en contacto con el bloque vitrificado. Por tanto, necesitamos saber la tasa a la que podría producirse esa lixiviación. La radiación, y especialmente la desintegración α de los actínidos, puede afectar a la tasa de lixiviación, por lo que necesitamos determinar la magnitud de este fenómeno. La radiación, asimismo, puede conducir a la producción de radicales libres en el agua presente (lo que podría también aumentar la tasa





Modelo de desecho radiactivo vitrificado. Si toda la electricidad utilizada por una persona a lo largo de su vida fuese producida mediante la energía nuclear este volumen de vidrio sería suficiente para obtener todos los desechos de alto nivel resultantes.

de lixiviación) y de ácido nítrico por irradiación del aire o del nitrógeno en contacto con el agua. Es evidente que necesitamos conocer plenamente todos estos mecanismos.

La segunda barrera es el contenedor resistente a la corrosión en el que se encapsula el bloque vitrificado. Su finalidad es retardar el momento en que el bloque podría quedar expuesto al agua y, por consiguiente a la lixiviación. El propósito es que esta barrera permanezca intacta por lo menos los varios centenares de años necesarios para que los productos de fisión de más alta actividad, en particular el cesio-137, y el estroncio-90, se desintegren hasta un nivel insignificante. En consecuencia debemos preguntarnos ¿cuánto tiempo resistirá un contenedor a la corrosión? ¿500 o tal vez 1000 años? ¿Cuáles son los mejores materiales a utilizar? ¿Qué tipo de obstáculo presentará el contenedor a la lixiviación incluso después de haber sido atacado por la corrosión?

La tercera barrera es el material de relleno con que se rodea al contenedor y que debe complementar las propiedades del medio geológico para obstaculizar la migración de los radionucleidos. Se pueden utilizar materiales que actuarán de barrera contra la intrusión del agua, inhibirán la corrosión, y reaccionarán químicamente con los elementos radiactivos que sean lixivados del vidrio, a fin de limitar su dispersión. Necesitamos saber qué materiales emplear (se usarán distintos materiales según las condiciones geológicas) y con qué eficacia actuarán de barrera estos materiales.

La cuarta barrera es la naturaleza misma de la formación geológica elegida para servir de cementerio. Se requieren formaciones muy poco permeables al agua (para limitar la tasa de lixiviación y limitar la rapidez con la que los radionucleidos lixivados pueden ser devueltos a la biosfera). Necesitamos determinar la velocidad de movimiento de las aguas subterráneas (que en casos típicos puede ser del orden de 0,1–0,2 litros por metro cuadrado y por año). Necesitamos determinar si esta velocidad podrá aumentar ya sea por fisuración natural de la roca o por fisuración provocada por el calor de los desechos. Además necesitamos determinar la probabilidad de que ocurra un seísmo u otros fenómenos que perturben la barrera geológica.

La quinta barrera está constituida por la naturaleza geoquímica de las rocas. Muchos de los radionucleidos interaccionarán con el medio geológico que atraviesan y serán retenidos por procesos, por ejemplo, de intercambio iónico, absorción superficial o precipitación. Por ello, incluso si todas las otras barreras fallan, muchos de los radionucleidos se desplazarán por el medio geológico a una velocidad mucho menor que la del agua y es posible que se hayan desintegrado antes de alcanzar la biosfera. Por otra parte, ciertos radionucleidos solo son retrasados muy poco por estos procesos. Por consiguiente, necesitamos comprender y cuantificar estos efectos.

Por último, hay la barrera ambiental. Eventualmente, ya que siempre partimos de supuestos pesimistas y

prudentes a fin de pecar por exceso de seguridad, debemos suponer que todas las precedentes precauciones han fallado en último término y que, por consiguiente, alguna radiactividad alcanzará la biosfera (nos referimos aquí a decenas o tal vez a centenares de miles de años en el futuro). ¿Qué riesgo presentarán los desechos teniendo en cuenta que la radiactividad es un fenómeno natural y universal y que una vez en la biosfera los radionucleidos procedentes de los desechos estarán sometidos a una extensa dilución? Para completar una rigurosa evaluación de los riesgos resultantes de la evacuación geológica de los desechos, debemos poder cuantificar exactamente la eficacia real de esta barrera ambiental.

Efectividad superior a lo supuesto

Desde el comienzo del importante programa de investigación sobre estas cuestiones, a mediados de los años 70, han aumentado notablemente nuestros conocimientos en este terreno y sabemos ahora que algunas de esas barreras son varios órdenes de magnitud más eficaces que lo que se había creído. Nuestros conocimientos se han perfeccionado en gran medida gracias a trabajos efectuados en diversos países: por ejemplo, el estudio sueco KBS, las investigaciones realizadas en el Canadá y el programa ejecutado por la Comisión de las Comunidades Europeas. La literatura publicada sobre estos temas es abundante.

En particular, los experimentos efectuados en Harwell, en los que se ha dopado vidrio con $^{238}\text{PuO}_2$, han puesto de manifiesto que a una dosis de radiación correspondiente a una vida de un millón de años aproximadamente de los desechos vitrificados procedentes de reactores Magnox del Reino Unido, la tasa de lixiviación había aumentado solo en un factor de dos. Estos trabajos, y otros análogos sobre el posible efecto de la radiación sobre el agua que podría hallarse presente, inspiran confianza en el sentido de que la radiación no afectará de modo significativo la capacidad de retención de los desechos por el vidrio.

Se ha determinado también ahora que las probables tasas de lixiviación en medios geológicos son muy bajas, y de hecho es posible que dependan de la existencia de agua subterránea. En cualquier caso, es posible que este fenómeno sea muy limitado debido a las propiedades hidráulicas de la roca hospedante y del material de relleno. Sabemos asimismo que como los bloques de vidrio están expuestos a la lixiviación, la capa empobrecida que se forma en la superficie actúa reteniendo diferencialmente ciertos elementos; en particular, se observa una retención notable de actínidos, que poseen una tasa de lixiviación menor en varios órdenes de magnitud que el conjunto del material que había servido de base para los primeros cálculos.

El estudio sueco mencionado anteriormente se basó en múltiples experimentos realizados en formaciones de roca dura. Los trabajos prosiguen, pero parecen indicar ya que es perfectamente posible diseñar cementerios en roca dura de modo que la cantidad máxima de radiactividad que podría retornar al medio humano no podría hacerlo en menos de 100 000 años

y que incluso partiendo de hipótesis prudenciales cualquier dosis de radiación resultante será pequeña comparada con la de radiación de fondo natural.

Perspectivas de un programa de sondeos

Como resultado de estudios y trabajos experimentales en varios países —y en diferentes tipos de roca— podemos depositar un elevado grado de confianza en la seguridad y aceptabilidad de la evacuación geológica como etapa final de nuestra estrategia de gestión de desechos de alto nivel. Sin embargo, establecer condiciones seguras es siempre un proceso continuo. Hay muchas esferas en las que necesitamos mejorar nuestros conocimientos y afinar hipótesis que sabemos que son prudenciales pero para las que poseemos insuficientes pruebas experimentales. Es sobre todo por tal razón por la que el Reino Unido ejecutó un programa de sondeos a fin de obtener nuevos datos genéricos acerca de las propiedades a niveles profundos de diferentes tipos de rocas existentes en el Reino Unido, así como acerca de su conductividad, contenido de agua, fisuración y propiedades geoquímicas. Mediante el programa no se trataba de localizar emplazamientos concretos.

Cabe discutir la conveniencia de realizar dichos trabajos en esta etapa. Creo que ya disponemos de suficiente información para estar convencidos de que nuestra estrategia general es acertada. No hay ninguna necesidad inmediata de evacuar desechos de alto nivel: como he dicho, el almacenamiento de desechos vitrificados es la línea de acción preferida durante los primeros 50 a 100 años después de su extracción del reactor. El Departamento del Medio Ambiente —encargado de este programa en el Reino Unido— examinó recientemente el programa de investigaciones geológicas del país, y llegó a la conclusión de que ha quedado probada en principio la viabilidad de evacuar desechos en cementerios bajo tierra, y de que nada parece indicar que tal operación sería inaceptable. Por consiguiente, ha decidido que, por no haber necesidad inmediata de estas investigaciones debido a la limitación de los recursos con los que se debe atender a los siguientes fines no se ampliará el programa de sondeos.

Muchos investigadores desearían que continuasen los trabajos para reforzar así todavía más nuestra confianza en nuestro conocimiento y capacidad de predicción del comportamiento de los desechos una vez depositados en una formación geológica; para demostrar al público que al preparar las medidas de seguridad se han tenido en cuenta incluso las posibilidades más remotas; y para asegurar que cuando nuestros descendientes decidan evacuar los desechos (si esa es la solución que finalmente se prefiere) disponen de la información más completa posible sobre este tema. Me inclino a compartir tal opinión. Sin embargo, estoy decididamente convencido de que el Gobierno ha adoptado una actitud perfectamente plausible a la luz de todas las pruebas que se le han presentado y de la necesidad de conseguir una solución intermedia entre la realización de investigaciones justificadas y la suma de los recursos de que dispone.

