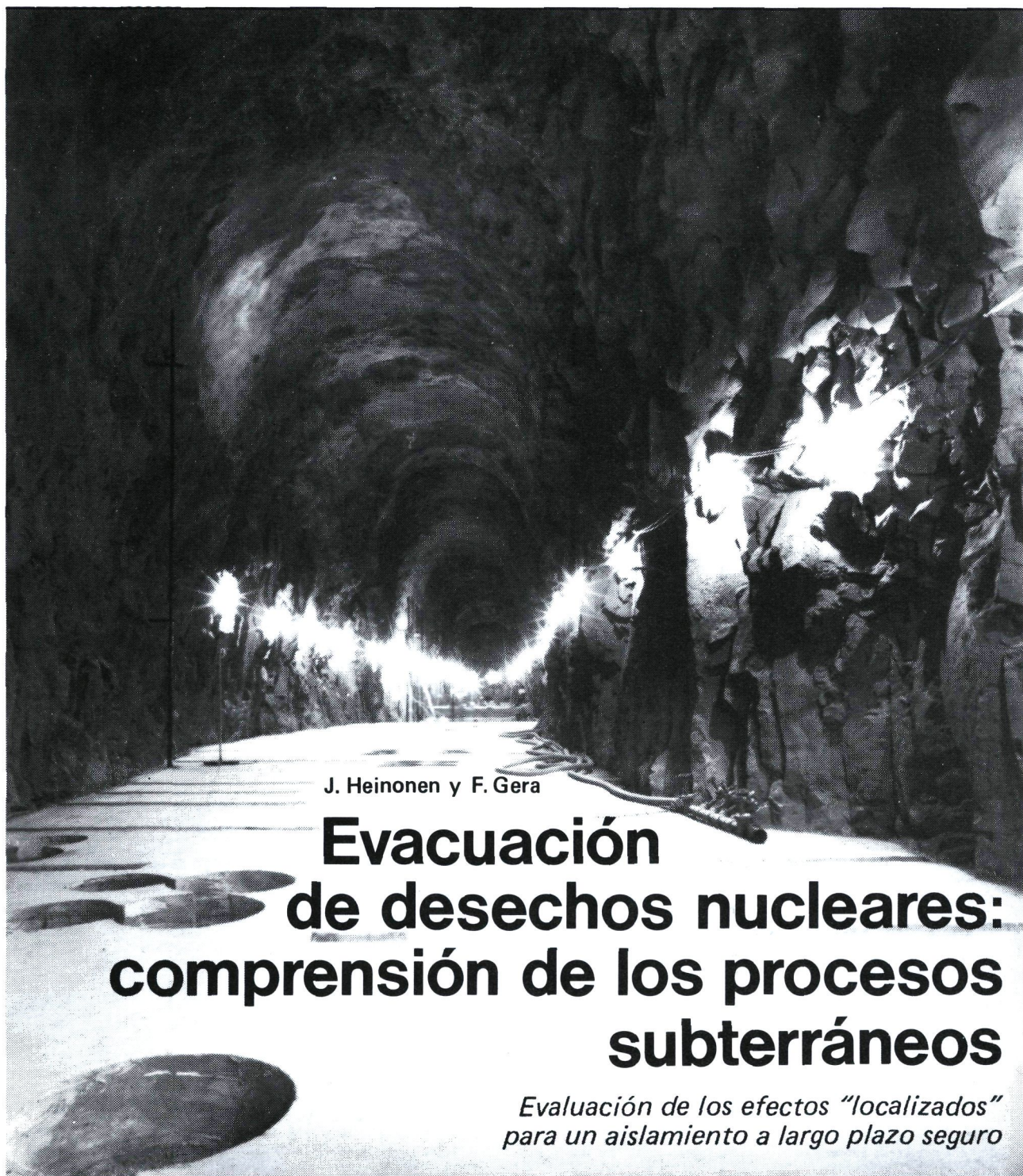




J. Heinonen y F. Gera

Evacuación de desechos nucleares: comprensión de los procesos subterráneos

*Evaluación de los efectos "localizados"
para un aislamiento a largo plazo seguro*

Se están estudiando, desarrollando, e incluso aplicando con algunas clases de desechos, muchos tipos diferentes de sistemas de repositorios. Estos sistemas se basan en distintos tipos de rocas hospedantes y diferentes diseños de repositorios.

Dicho llanamente, en la evacuación de desechos radiactivos prima el concepto de las barreras múltiples.

En los repositorios excavados en rocas hospedantes que presentan alguna posibilidad para el transporte de radionucleidos, será necesario compensar esa característica con otros componentes del sistema de evacuación que impidan o limiten la movilización de los radionucleidos.

Los efectos "localizados" —término que generalmente se refiere al propio repositorio, al embalaje de desechos

El Sr. Heinonen ha sido funcionario de la División del Ciclo del Combustible Nuclear del Organismo, y el Sr. Gera es funcionario del Istituto Sperimentale Modelli e Strutture, S.p.A. (ISMES), Via dei Crociferi 44, I-00187 Roma, Italia.

Las formaciones de rocas basálticas son uno de los medios geológicos que se están considerando para la evacuación de desechos nucleares. El basalto es una roca volcánica densa depositada por corrientes de lava que lentamente cubrieron la superficie de la tierra hasta hace 16 millones de años (Foto: Atomic Industrial Forum).

y a la roca hospedante (véase el recuadro anexo)— se entienden bastante bien en relación con ciertos tipos de rocas y diseños de repositorios y cuando se les estudia aisladamente*. Este artículo trata sobre los efectos localizados siguientes: corrosión del embalaje de desechos, lixiviación, cambios químicos y mineralógicos, modificaciones en la corriente de las aguas subterráneas y transporte de radionucleidos hacia el campo lejano.

Para evaluar los resultados de los sistemas de evacuación en la contención de los desechos radiactivos, es necesario considerar esos efectos diversos en conjunto. Establecer esta relación es lo más difícil de la evaluación y exige que se continúen las investigaciones a fin de reducir las incertidumbres acerca del comportamiento de los diversos componentes del campo próximo.

Por ejemplo, en un repositorio de roca dura los efectos termomecánicos pueden afectar la permeabilidad de la roca y la corriente de las aguas subterráneas de modo tal que puede ser difícil elaborar un modelo satisfactorio. Además, la presencia de desechos puede modificar el medio químico, y la radiolisis puede dar origen a condiciones oxidantes. Por otra parte, las barreras tecnológicas que rodean los desechos se pueden diseñar de modo que, por su gran capacidad para aislar los radionucleidos críticos, compensen toda incertidumbre acerca de la relación entre los efectos localizados y del comportamiento a largo plazo de los diferentes componentes.

Aún es necesario realizar experimentos in situ minuciosos, por ejemplo, para conocer mejor algunos efectos localizados, así como para cuantificar los resultados de algunos parámetros. De esta forma, al evaluar el comportamiento de todo el sistema de evacuación se podrán integrar los efectos localizados. La ejecución de proyectos importantes en varios países debería aumentar la comprensión de los fenómenos del campo próximo y fomentar la difusión de estos conocimientos en particular. La creación de sistemas de evacuación específicos, en particular para desechos de alta actividad y de período largo, requiere complejas y prolongadas investigaciones en los emplazamientos concretos.

En términos generales, el perfeccionamiento de los conocimientos y el desarrollo de la tecnología aumentarán la seguridad en materia de evacuación de desechos, y los datos experimentales permitirán verificar modelos que comúnmente se basan en experimentos de laboratorio y en consideraciones teóricas.

Corrosión de los embalajes de desechos

La movilización de los radionucleidos —que se atribuye a la lixiviación causada por las aguas subterráneas— no se produce mientras el embalaje de los desechos no se deteriore. El embalaje consiste en la forma de desecho, el recipiente y, cuando proceda, otras barreras tales como material de embalaje adicional absorbente y acondicionadores químicos, siempre y

Efectos “localizados” —definición de términos

Para evaluar un sistema geológico de evacuación de desechos radiactivos de período largo, es necesario entender el comportamiento a largo plazo de los distintos elementos que ayudan a aislar los desechos. Es evidente que en un sistema de aislamiento las características importantes son aquellas que están relacionadas con el comportamiento general, y particularmente las que atañen a cuestiones de seguridad.

Sin embargo, para facilitar la evaluación del comportamiento de los repositorios subterráneos, los fenómenos pertinentes se dividen en fenómenos de campo próximo y fenómenos de campo lejano. Se trata de una clasificación arbitraria, ya que entre ellos no existe ningún límite físico bien definido. En este artículo se examinan los procesos que ocurren en el campo próximo en rocas hospedantes de diferentes tipos y a la luz de conceptos de evacuación distintos. Se define como campo cercano el “repositorio excavado, incluidos el embalaje de desechos, los materiales de relleno o de sellado, y aquellas partes del medio hospedante cuyas características hayan sido o podrán ser alteradas por el repositorio o por su contenido.”

El número y la naturaleza de los componentes que están realmente presentes en el campo próximo responden a las características concretas de cada sistema de evacuación y dependen de la naturaleza de la roca hospedante y de los desechos, así como de los aspectos técnicos del repositorio. Gran parte de los efectos localizados que se analizan en este trabajo están relacionados con la evacuación de desechos vitrificados de actividad alta y de combustible irradiado; no obstante, cuando se ha considerado necesario, se han incluido efectos característicos de otros tipos de desechos.

Componentes específicos

Cabe considerar que los componentes del campo próximo son el embalaje de desechos, el repositorio y la roca hospedante.

El **embalaje de desechos** comprende el desecho, su contenedor y todas las barreras adicionales, siempre y cuando sean parte integrante del embalaje.

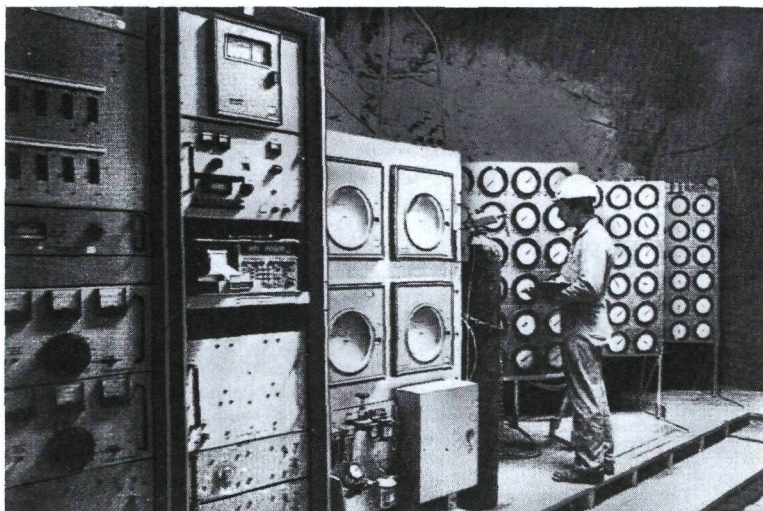
El **repositorio** es la instalación subterránea donde se colocan los embalajes de desechos. Incluye todas las barreras tecnológicas que separan los embalajes de la roca hospedante, los materiales estructurales como el revestimiento de los túneles y los revestimientos interiores de las calas, los materiales de relleno y los de sellado.

La **roca hospedante**, incluida en el campo próximo, es la parte del medio de evacuación cuyas propiedades físicas y condiciones químicas son significativamente modificadas por el repositorio. La extensión real de la zona modificada varía con el tipo de desecho, el diseño del repositorio y la roca hospedante, pero nunca será mayor de unas cuantas decenas de metros.

El campo próximo está rodeado por la sección de la roca hospedante donde los cambios que se producen por efecto del repositorio son insignificantes, y por los otros materiales geológicos que puedan existir entre la roca hospedante y la superficie del terreno. El medio geológico que circunda el campo próximo, es decir, el campo lejano, no se estudia en este artículo, pero interactúa marcadamente con el campo próximo ya que los procesos que ocurren en este último determinan la fuente del transporte de radionucleidos hacia la geosfera. A la inversa, la migración potencial en el campo lejano determina el número y la naturaleza de las barreras que se han de emplear en el campo próximo.

Los tipos de rocas que en la actualidad se consideran como posibles rocas hospedantes para desechos radiactivos de período largo son, entre otras, la sal de roca, el granito y las rocas cristalinas similares, las rocas arcillosas, la toba y basalto.

* Para una información técnica más amplia, véase “Deep Underground Disposal of Radioactive Waste – Near-Field Effects”, proyecto de un informe técnico del OIEA, junio de 1984; y “Effects of Heat from High-level Waste on Performance of Deep Geological Repository Components”, proyecto de un documento técnico del Organismo, octubre de 1983.



En una serie de experimentos realizados entre 1977 y 1980 en la mina de Stripa, en la zona central de Suecia, los científicos estudiaron la evacuación subterránea de desechos nucleares en roca cristalina dura. Foto de arriba: mediciones ultrasónicas realizadas durante un experimento térmico a escala plena. Foto de abajo: en un experimento de macropereabilidad se midieron presiones del agua en unas 100 secciones y 15 perforaciones. (Fotos: SKBF KBS, Estocolmo.)

cuando éstos formen parte del embalaje. Es posible diseñar embalajes de desechos de casi cualquier duración que se necesite. Se han considerado diseños con una vida útil de más de 100 000 años, pero en la mayoría de los casos se prevé una duración mucho más corta.

Se pueden usar distintas clases de materiales para estos embalajes. Algunos conceptos se basan en el empleo de materiales que mantienen estabilidad termodinámica en el medio del repositorio. Otros materiales, aunque inestables, forman un revestimiento protector que reduce notablemente el deterioro ulterior. Por último, se podrían emplear capas relativamente gruesas de materiales cuya velocidad de corrosión sea conocida. Las decisiones en relación con los embalajes de desechos en condiciones de repositorio concretas dependerán de diversos factores, entre ellos los requisitos de reglamentación, la capacidad de aislamiento de las otras barreras y los costos.

Lixiviación causada por la aguas subterráneas

Cuando los embalajes se deterioran, a la larga los desechos entran en contacto con agua o con salmuera. Las reacciones que se producen entre la matriz de desechos y el agua provocan alguna disolución de los radionucleidos. La velocidad de la reacción depende de la forma del desecho, su composición, la relación entre el volumen de agua y la superficie expuesta, la velocidad efectiva de la corriente de agua que pasa por el lugar en

que están los desechos, la temperatura, y algunos otros factores, como la radiolisis. La composición del agua que entra en contacto con los desechos depende de la composición del agua intersticial de la roca hospedante, que puede ser modificada por las sustancias que se desprenden del material separador, del material de relleno y del embalaje de desechos. La corriente de agua que pasa por el lugar que ocupan los desechos está determinada en gran medida por la corriente de aguas subterráneas del campo lejano, ya que ésta controla la cantidad de agua que llega al repositorio. La velocidad del agua que pasa por el emplazamiento de los embalajes puede estar limitada además por los materiales de baja permeabilidad que se coloquen en torno al desecho. Estas barreras adicionales pueden reducir la corriente de agua a valores sumamente bajos y disminuir significativamente la lixiviación de muchos radionucleidos.

Efectos de la radiación

La radiación puede modificar el medio del campo próximo por la acción de tres efectos primarios diferentes: la alteración del desecho y de cualquier clase de material separador, la de cualquier fluido presente alrededor del desecho y la de la roca hospedante. Debido a las propiedades protectoras de la materia sólida, la radiación gamma se adsorberá por completo en un radio de aproximadamente un metro de los recipientes que contienen los desechos. Las radiaciones beta y alfa, que son mucho

menos penetrantes, se adsorberán dentro de un volumen de material muy pequeño. Sin embargo, la radiólisis puede producir sustancias corrosivas que aceleran el proceso de corrosión de los depósitos y aumentan la lixiviación de los desechos. Se ha observado que en la evacuación de desechos no resultan pertinentes otros efectos de la radiación tales como el almacenamiento de energía y los cambios en las propiedades físicas de las rocas y de los materiales artificiales.

Efectos térmicos

La energía de las radiaciones absorbida por la materia se transforma en calor. La mayor generación de calor corresponde al combustible irradiado y a los desechos de actividad alta, pero cualquier clase de desecho radiactivo genera algún calor. En un repositorio, el calor que se desprende del desecho atraviesa el contenedor y los materiales separadores y llega a la roca hospedante, lo que eleva la temperatura de todos los componentes del campo próximo y afecta sus propiedades fisicoquímicas. La distribución real de la temperatura del repositorio depende de muchos factores, entre los que se incluyen:

- la clase de desecho y su edad;
- las dimensiones y la distribución de los contenedores de desechos;
- el volumen y la naturaleza de los materiales de separación y de relleno;
- el diseño del repositorio;
- la clase de roca hospedante.

La temperatura del repositorio llegará al máximo algunos decenios después de la colocación de los desechos. Se han elaborado y comprobado programas de computadora sumamente confiables capaces de pronosticar la distribución de la temperatura dentro del repositorio en cualquier época dada.

Se han realizado investigaciones, que todavía continúan, sobre los efectos de las altas temperaturas en distintas formas de desecho, en los materiales de separación y de relleno y en las rocas hospedantes. Un efecto térmico de particular importancia para los repositorios emplazados en rocas graníticas o cristalinas similares es la posible modificación de la corriente de las aguas subterráneas. Si la roca está fracturada y hay agua en las fracturas, lo cual es prácticamente inevitable en esta clase de roca en las dimensiones de un repositorio, la elevación térmica puede hacer disminuir la viscosidad y la densidad del agua y aumentar la permeabilidad de algunas fracturas, lo que originaría una corriente de agua termoinducida e incluso células de convección.

Los estudios sobre los efectos térmicos cumplen el objetivo de definir criterios térmicos en relación con los distintos componentes de los repositorios. La observancia de estos criterios debe garantizar que no se produzcan efectos que menoscaben las propiedades aislantes del sistema de evacuación. Por ahora, parece que los límites de temperatura más restrictivos son los que corresponden a los minerales arcillosos que están en la roca hospedante o en los materiales de separación y relleno. Se considera prudente mantener la temperatura de los materiales arcillosos por debajo de los 100°C. Con la sal gema sería permisible alcanzar temperaturas algo más elevadas; esto, unido a la alta conductividad térmica de la sal, significa que en un repositorio de sal se podría colocar una carga térmica mucho mayor.

Efectos termomecánicos

Un efecto específico del calentamiento de la roca hospedante es su expansión térmica y las tensiones resultantes tanto en el campo próximo como en el lejano. En un repositorio excavado la roca ya está sometida a tensiones de sobrecarga, y tal vez a tensiones tectónicas modificadas localmente por las excavaciones. A este campo de tensiones relativamente complejo se suman las tensiones termoinducidas. Existe abundante información sobre los efectos termomecánicos en la sal. Los cálculos y las observaciones se corresponden muy bien. En las rocas duras como el granito, las tensiones son absorbidas por las juntas y las fracturas, que prácticamente impiden elaborar un modelo satisfactorio. El resultado es que hay algunas diferencias entre los datos teóricos y los experimentales.

En lo que respecta a las arcillas, se dispone de escasa información acerca de su comportamiento mecánico en las profundidades de los repositorios. Menos aún se sabe acerca de su comportamiento termomecánico, ya que todavía no se han llevado a cabo ensayos profundos in situ. Lo anterior es válido para otras rocas potencialmente hospedantes. No se prevé que haya dificultades especiales como resultado de los efectos termomecánicos, sin embargo, es necesario conocerlos para perfeccionar el diseño de los repositorios.

Cambios químicos y mineralógicos

La excavación de un repositorio y el emplazamiento de embalajes de desechos y de otros materiales en la roca hospedante rompen el equilibrio natural que existe entre la roca hospedante y el agua intersticial. Las excavaciones permiten la entrada de oxígeno y provocan cambios en las tensiones in situ y en los gradientes hidráulicos. Todas estas alteraciones pueden provocar cambios en la mineralogía de la roca hospedante y en la química de las aguas subterráneas. La probabilidad de que se produzcan cambios químicos y mineralógicos aumenta con la elevación de la temperatura que provocan los desechos. No obstante, si al diseñar el repositorio se aplican criterios térmicos apropiados, cabe esperar que estos cambios sean insignificantes y estén limitados a un reducido volumen de material.

Corriente de agua subterránea

Puesto que el agua es el medio de transporte principal de los radionucleidos que escapan de los embalajes de desechos, cualquier modificación en la corriente de las aguas subterráneas puede tener un interés particular. En lo que respecta a los efectos localizados, existen cuatro mecanismos básicos que pueden modificar la corriente de las aguas subterráneas:

- la colocación de barreras de baja permeabilidad;
- el efecto de drenaje de las excavaciones subterráneas;
- los cambios en las propiedades físicas de la roca hospedante;
- el calentamiento que provocan los desechos.

La probabilidad de migración del agua en el campo próximo varía en cada uno de los tipos de roca hospedante propuestos. La sal suele ser sumamente impermeable y estar libre de circulación de agua. La única agua que se encuentra en la zona de evacuación



Aislamiento: las formaciones de toba volcánica del Campo de Pruebas de Nevada es una de las zonas de los Estados Unidos que se están estudiando como posibles emplazamientos de repositorios geológicos para la evacuación de desechos radiactivos de alta actividad. La toba es una roca compuesta de cenizas volcánicas solidificadas y fundidas, en capas separadas depositadas por sucesivas erupciones hace millones de años (Foto: Atomic Industrial Forum).

está en forma de salmuera en pequeñas inclusiones. El contenido total de agua en la sal suele ser del orden del 1 al 2 por ciento en la sal en capas, y muy por debajo del 1 por ciento en la sal diapírica. El principal efecto localizado de la sal sería la migración de las inclusiones de salmuera hacia las fuentes de calor. Si bien este fenómeno puede tener efectos significativos sobre las condiciones químicas de las inmediaciones de los desechos y sobre la corrosión de los depósitos, los volúmenes de salmuera son demasiado pequeños para ocasionar una migración importante de radionucleidos.

En el granito y otras rocas cristalinas similares, la circulación de las aguas subterráneas está regulada por la extensión, las características y la interconexión de las fracturas, y por los gradientes hidráulicos regionales. Para que un cuerpo de roca dura se considere apropiado para la evacuación de desechos, deberá caracterizarse por una conductividad hidráulica muy baja; es decir, deberá tener pocas fracturas y éstas deben dejar pasar muy poca cantidad de agua, por estar ocluidas por la tensión de sobrecarga, por la acumulación de minerales secundarios, o por la combinación de los dos mecanismos. La excavación de un repositorio en un medio geológico de este tipo modificará la corriente de las aguas subterráneas incluso antes de colocarse los desechos en las cavidades subterráneas. Esto se debe al drenaje que

provocan las excavaciones, que, por estar a presión atmosférica, funcionan como sumideros, y a los cambios en la permeabilidad que la modificación del campo de tensiones podría inducir en las fracturas situadas junto a las aberturas.

Después del emplazamiento de los desechos y de la colocación del material separador en el repositorio, la hidrología del campo próximo puede sufrir modificaciones ulteriores por la acción de los efectos termomecánicos ya analizados y por la presencia del material separador y de relleno. En conclusión, la elaboración del modelo hidrogeológico de un repositorio en roca dura puede ser algo compleja. Las incertidumbres al respecto pueden compensarse con un campo lejano de gran capacidad para limitar la migración de radionucleidos, o con la colocación de barreras tecnológicas en el repositorio.

Las rocas arcillosas suelen caracterizarse por una baja permeabilidad. En las arcillas plásticas toda el agua pasa a través de los poros, mientras que en las arcillas consistentes y en los esquistos pueden producirse fracturas donde el agua puede acumularse. Se supone que las formaciones arcillosas aptas para la evacuación de desechos no deben estar surcadas por fracturas permeables. Una vez que los desechos se colocan en el repositorio y que éste se rellena y se sella, las condiciones del campo próximo dependerán del diseño del repositorio.

Por ejemplo, en un repositorio que tenga como base una matriz de calas perforadas desde la superficie, cada una de las calas quedaría aislada de las demás y los contenedores estarían en contacto más o menos directo con la arcilla. En un repositorio excavado, los contenedores podrían colocarse en pozos de evacuación perforados desde las galerías o dentro de las propias galerías. En cualquiera de los dos últimos casos, las galerías se rellenarían con un material de propiedades hidráulicas probablemente diferentes de las de las arcillas no alteradas.

Por lo tanto, la hidrogeología del campo próximo sería muy diferente de las condiciones iniciales de la formación. Sin embargo, si las vías de comunicación del repositorio con la superficie se bloquean y no se abren nuevas vías de agua, a causa de incidentes ulteriores, los cambios en las corrientes subterráneas del campo próximo son locales y de período corto, y cabe suponer que no tengan efectos apreciables en el comportamiento general del sistema de evacuación.

En un repositorio excavado en toba, en la zona no saturada, la evacuación de los desechos no debe tener grandes repercusiones en la corriente de aguas subterráneas. Es de suponer que el campo térmico desvíe el agua y reduzca la corriente que pasa por el lugar donde están colocados los embalajes.

En el caso de repositorios emplazados en formaciones basálticas, los efectos en la corriente de las aguas subterráneas serían similares a los ya descritos para los repositorios graníticos.

Transporte de radionucleidos hacia el campo lejano

Los efectos localizados descritos hasta ahora no deben estudiarse aisladamente; por el contrario, el análisis debe centrarse en cómo se relacionan entre sí y dar lugar a una evaluación realista del transporte potencial de radionucleidos hacia el campo lejano.

En los repositorios emplazados en rocas graníticas o rocas cristalinas similares, el escape y el transporte de radionucleidos estarán determinados principalmente por la velocidad de la corriente de agua en las fisuras de la roca. La presencia de minerales de hierro ferrosos controla el potencial de redox del agua y puede reducir la solubilidad de muchos actínidos a valores muy bajos. Los radionucleidos también pueden esparcirse por la matriz de la roca y ser absorbidos por las superficies porosas, lo que los hará separarse del agua que pasa a través de las fisuras.

En los repositorios de sal no es posible el transporte de radionucleidos hacia el campo lejano si en el campo próximo no entran nuevos fluidos procedentes del exterior del repositorio. Si el repositorio se inunda —lo cual es sumamente improbable cuando el diseño es adecuado— el transporte de radionucleidos hacia el campo lejano dependería casi por completo de la estructura del repositorio.

Con respecto al repositorio de rocas arcillosas, suponiendo que no ocurran sucesos anormales y que no se produzcan vías preferenciales en la formación geológica, la migración de radionucleidos quedaría controlada por la difusión. En una formación arcillosa de dimensiones adecuadas y con propiedades hidráulicas representativas, se puede calcular que los radionucleidos que se absorben se desintegrarían hasta alcanzar niveles insignificantes a unos cuantos metros de los embalajes. Por otra parte, los radionucleidos que no se absorben, como el yodo-129, podrían migrar hacia el campo lejano y escapar parcialmente de la formación de evacuación.

En un repositorio de toba, la migración de los radionucleidos del campo próximo dependería, como en otros tipos de rocas, de la velocidad de movilización de los radionucleidos y de la magnitud de la corriente de los fluidos. Las especies absorbidas se verían retardadas fundamentalmente por reacción con las zeolitas, minerales secundarios resultantes de la alteración de las cenizas. La eficacia de la toba como barrera geoquímica dependerá en gran medida de su contenido de zeolita. Por consiguiente, toda evaluación del transporte potencial de radionucleidos en una formación de toba determinada requerirá de datos concretos sobre la corriente de los fluidos y la composición mineralógica de la roca.

En un repositorio de basalto se daría una situación algo similar a la descrita con el granito, ya que el transporte de radionucleidos se produciría como resultado del paso del agua por las fracturas. Existirían las mismas incertidumbres para relacionar los efectos termomecánicos con la permeabilidad de las fracturas y la corriente de las aguas subterráneas. Las incertidumbres se pueden reducir si se cuenta con datos sobre el emplazamiento de que se trate y se pueden compensar con barreras tecnológicas eficaces.

Estudios en ejecución y estudios futuros

La lista que aparece a continuación ofrece ejemplos de actividades en ejecución o planificadas, que pueden contribuir a ampliar la comprensión de los efectos localizados:

- investigaciones sobre la corriente de las aguas subterráneas en distintos medios geológicos;
- estudios sobre la migración de radionucleidos en distintas rocas y en diferentes condiciones hidrogeológicas;
- comprobación de modelos; en particular, identificación, cuantificación y verificación de algunos parámetros;
- investigación sobre distintos materiales separadores, incluidos ensayos de masas separadoras y análisis amplio de los resultados;
- experimentos de transferencia térmica en varias rocas potencialmente hospedantes;
- estudio de los movimientos de rocas termoinducidos;
- perfeccionamiento de métodos para evaluar el comportamiento de las rocas, incluidos los efectos de las tensiones en las rocas y la generación de fracturas;
- comportamiento químico y fisicoquímico de algunos radionucleidos importantes, por ejemplo, los mecanismos de disolución, lixiviación y migración de actínidos.

