

Pedro CARBONERAS MARTINEZ (1947) es Ingeniero Industrial, especialidad Técnicas Energéticas. Fue Jefe de Producción de CN Almaraz desde mayo de 1973 hasta agosto de 1982, participando en las fases de construcción, puesta en marcha y principio de explotación. Posteriormente y hasta diciembre de 1985, ocupó el cargo de Jefe de Seguridad y Licenciamiento de la misma Central, siendo el encargado de la seguridad en operación. Desde el inicio de las actividades de ENRESA, en diciembre de 1985, es Jefe del Departamento de Seguridad y Licenciamiento. Ha participado en cursos y en seminarios en el extranjero y ha sido representante español en grupos de trabajo internacionales en la CEE, la NEA y el OIEA. Durante tres años fue profesor del Curso de Ingeniería Nuclear. Es miembro de la Sociedad Nuclear Española y de la Sociedad Española de protección Radiológica.

José M.^a GRAVALOS LASUEN es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza. Comenzó su actividad profesional el año 1974 en SENER, participando en los proyectos de las Centrales Nucleares de Lemoniz y Cofrentes. En 1976 pasó a INTECSA, donde participó en numerosos proyectos energéticos, nucleares y convencionales, llegando a ocupar el puesto de Jefe de la División de Energía. Desde septiembre de 1985, es responsable del Departamento de Ingeniería de la Dirección de Ingeniería y Proyectos de ENRESA.

Carlos DEL OLMO ALONSO es Ingeniero de Minas. Comenzó su actividad profesional en 1976 en el Departamento de Estudios de POTASAS DE NAVARRA, S. A., donde posteriormente ocupó el puesto de Jefe de Mecánica de Rocas y Geología, siendo el responsable de diversos programas de exploración y explotación, tanto en la cuenca potásica navarra como en la catalana. Igualmente ha sido el Jefe del Departamento de Mantenimiento Minero de la División Minera. En 1985 pasó al Departamento de Minería de la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, donde se ocupó de diversos proyectos relacionados con la minería de carbón y el mantenimiento de galerías. Desde diciembre de 1985 es responsable del Departamento de Selección de Emplazamientos de la Dirección de Ingeniería y Proyectos de ENRESA.

RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

LA SEGURIDAD DE LOS ALMACENAMIENTOS

EVALUACION DE SU COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO
COMO ELEMENTO BASICO DEL PROCESO DE ACEPTACION Y
AUTORIZACION

P. CARBONERAS, J. M.^a GRAVALOS, C. DEL OLMO

INTRODUCCION

Las instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos son, globalmente, de tipo pasivo y en ellas la probabilidad de un accidente de iniciación interna es escasa (los procesos operativos son simples) mientras que los inducidos desde el exterior se ven minimizados por las barreras que se interponen como consecuencia de los criterios empleados en la selección del emplazamiento y en su construcción mediante la selección de diseños adecuados y siguiendo las normas elaboradas por las autoridades competentes.

No obstante lo anterior, la percepción del riesgo por parte del público respecto de dichas instalaciones es un hecho a considerar, ya que ejercerá una influencia indudable en la aceptación final de estas instalaciones de almacenamiento de unos residuos que existen de hecho. Por consiguiente, tanto desde un punto de vista técnico como desde el punto de vista de la opinión pública, es necesaria la demostración de que la citada instalación no supone un riesgo inaceptable para presentes o futuras generaciones, ni para el medio ambiente. Dentro de este contexto es la *protección diferida en el tiempo* el elemento singular de estas instalaciones y esto tanto en la situación de evolución normal, como en todas aquellas situaciones alteradas o accidentales

que puedan ser previsibles razonablemente. No puede olvidarse que no es posible asumir la hipótesis de una vigilancia institucional continuada tras el cierre por los elevados espacios temporales requeridos para que los residuos radiactivos sean inocuos.

Con todo ello, es necesario partir del principio de que una instalación de almacenamiento modifica el equilibrio existente en el medio y supone la adición de un *riesgo radiológico mayor que cero* en el ecosistema y en la especie humana del entorno. Justificar el carácter despreciable de este riesgo adicional respecto al que existe como consecuencia de la radiación natural es la tarea fundamental de aquellos organismos o empresas encargadas, en los diferentes países, de llevar a buen fin el almacenamiento de los residuos radiactivos existentes y generados en las diversas aplicaciones aceptadas y autorizadas.

LA SEGURIDAD DE LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIACTIVOS

El concepto de aislamiento

El problema que plantean los almacenamientos de estos residuos radica en los isótopos radiactivos que contienen

y que se encuentran en formas físicas y químicas variadas. El objetivo básico de seguridad se circunscribe al logro del aislamiento de tales isótopos del medio ambiente durante un período de tiempo suficiente para permitir su decaimiento y asegurar de ese modo su inocuidad. ENRESA orienta sus proyectos en la línea de almacenar los residuos en instalaciones adecuadas en formaciones geológicas continentales que serán someras en el caso de los residuos de actividad baja o media y tiempo corto de peligrosidad, y serán a elevada profundidad en los restantes casos.

En la concepción y el diseño de tales almacenamientos se emplea como criterio de seguridad el de las "barreras múltiples" que consiste, en esencia, en la interposición entre los isótopos radiactivos y el hombre de una serie de barreras sucesivas cuya misión es cooperar al aislamiento pleno deseado en diverso grado según el tipo de residuos y de instalación de que se trate de entre las mencionadas. Estas barreras son:

- El propio residuo y su forma física y química de preparación y acondicionamiento.
- El contenedor donde se ubique el residuo.
- Los materiales de relleno y sellado que pudieran situarse alrededor de los residuos en la concepción de la instalación.
- El medio geológico que albergue la instalación.

Aun cuando no se cataloga como barrera, se menciona también aquí a la biosfera del entorno del almacenamiento, ya que su capacidad de dispersión y/o reconcentración de las sustancias radiactivas debe ser considerado en el análisis de las vías de transferencia de las mismas hasta el hombre. Como ya se ha indicado, el papel que cada una de esas barreras debe jugar en el aislamiento deseado es muy variado y es función del tipo de instalación (somera o profunda) y del tipo de residuo radiactivo (actividad, vida de los isótopos, etc.).

La demostración de la seguridad

Parte esencial del proyecto de los almacenamientos de residuos radiactivos lo constituye la demostración de su seguridad. Esta demostración supone, en primer lugar, la tarea de conocer y predecir el comportamiento del almacenamiento y los isótopos radiactivos que contiene en cualquier condición y por el espacio temporal necesario y, en segundo lugar, contrastar los efectos que tales comportamientos producen en el hombre con los criterios de seguridad establecidos por los organismos reguladores. En la jerga

técnica, la primera tarea es conocida como el "performance assessment" (PA) o "evaluación del comportamiento del sistema", mientras que a la segunda se la viene llamando "safety assessment" (SA) o "evaluación de la seguridad".

En lo que sigue, el artículo se ocupa con exclusividad de los almacenamientos de residuos de alta actividad, centrándose en los aspectos radiológicos por ser los más precisos, singulares y complejos de la evaluación, si bien se reconoce que en una aplicación concreta será necesario evaluar otros impactos potenciales de la instalación en el medio ambiente que, dado el carácter fundamentalmente pasivo de la misma, se consideran sustancialmente menores, más convencionales y más simples de considerar.

La evaluación del comportamiento ("Performance Assessment" - PA)

La evaluación del comportamiento del almacenamiento supone la acometida de una serie de tareas que muy someramente podemos indicar como sigue:

Definición y descripción de los componentes del sistema

El conjunto final puede considerarse formado por tres bloques: el campo próximo (residuo, acondicionamiento, contenedor, relleno, sellado y zona afectada por el almacenamiento); el campo lejano (medio geológico circundante no perturbado por el almacenamiento), y la biosfera. En cada uno de estos bloques y entre ellos se producen fenómenos de origen propio o inducido, en los que juegan papeles esenciales la mecánica, la química, la geología, la transmisión de calor, la hidrología, la biología, la meteorología, etc.

Los parámetros que intervienen en estos fenómenos son difíciles de determinar con el detalle requerido para la previsión de su evolución, lo que genera una importante actividad de investigación y desarrollo tanto en campo como en laboratorio. Asimismo, la complejidad del sistema total induce a la citada aproximación por bloques cuyo comportamiento se simula por medio de modelos que se ajustan en base a la experiencia; estos modelos se comparan entre sí para asegurar su fiabilidad y se acoplan para conocer la respuesta integrada del sistema. La necesidad del uso de modelos es manifiesta dado, entre otros hechos, el factor temporal implicado (desde cientos hasta decenas de miles de años), lo que imposibilita la técnica experimental.

El empleo de estos modelos de forma correcta exige adecuarlos al caso específico, lo que obliga al conocimiento detallado de los parámetros básicos de

cada uno de los bloques, mediante la ejecución de profundos estudios locales. Es obvia la necesidad de coordinación adecuada entre "modelistas" y "parametrizadores" trabajando para un objetivo único.

Al final, todo centro de almacenamiento puede suponer la aparición de una cierta cantidad de radiactividad, calculable con los modelos antedichos y no existentes antes, en la biosfera del entorno, y es preciso determinar los daños que se causarían tanto en la especie humana como en los ecosistemas. La cuantificación de dicho daño viene establecida por las dosis radiológicas que se inducirían en seres humanos y, más actualmente, por la estimación del riesgo adicional inducido por causa de dichas dosis, calculado siguiendo estándares universalmente aceptados.

Definición y clasificación de escenarios a considerar

Se trata de la identificación y ordenación de todos los procesos o eventos que intervienen o pueden intervenir en el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo considerado en cada caso.

Es evidente de nuevo la complejidad objetiva de este tema en el caso de los espacios temporales dilatados que se requieren en los almacenamientos profundos para los residuos de alta actividad, por lo que se recurre al uso de una metodología genérica mediante dos aproximaciones complementarias:

- Una basada en métodos *deterministas* sobre la base de los acontecimientos ocurridos o de aquellos que puedan anticiparse como de ocurrencia casi cierta.
- Otra basada sobre consideraciones *probabilísticas* que empleará las probabilidades de los acontecimientos pasados y podrá añadir otros nuevos asignándoles su valor de probabilidad de ocurrencia y condiciones de contorno.

Estas dos aproximaciones complementarias permiten la clasificación de escenarios que sigue:

- Escenario de evolución normal o más probable, que se supone acontecerá.
- Escenarios de evolución anormal que suponen modificaciones del anterior, bien por la diferente secuencia de eventos o por la inclusión de acontecimientos nuevos de probabilidad baja que supongan variaciones (evolución alterada) o drásticos cambios (evolución catastrófica), del escenario normal.

El caso de los escenarios catastróficos tiene connotaciones específicas, por cuanto su probabilidad de ocurrencia es mínima y tremendamente incierta y porque puede argüirse que, en tal

caso, el tipo de efectos convencionales generados puede ser mucho mayor que el de los radiológicos debidos a la instalación.

En el caso de los residuos de actividad baja o media y vida corta con concepción de almacenamiento en superficie, el problema de los escenarios se simplifica extraordinariamente mediante la teoría de "escenario más conservador" (worst case), bien conocida.

Elección de los modelos, aplicación y análisis de resultados

- La concepción del cálculo reposa sobre la división espacial por "bloques" que se mencionó (campo próximo, campo lejano y biosfera). A partir de ella se han efectuado dos aproximaciones complementarias para el desarrollo de modelos:
 - **Por bloques**, en que se desarrollan modelos y se producen cálculos para cada uno de los bloques y/o cada uno de los procesos definidos en los escenarios, sin tener en cuenta las interacciones entre ellos en el tiempo, aunque definiendo las condiciones de acoplamiento correspondiente.
 - **Global**, en que el énfasis se pone a la consideración del sistema completo y acoplado, lo que exige, ineludiblemente, simplificaciones y agrupamientos de procesos con su valoración relativa. Generalmente se suele partir de un modelo global de cada uno de los bloques y se desarrolla un acoplamiento entre ellos.
- Desde el punto de la aplicación de los modelos y la ejecución de los cálculos correspondientes, se emplean, de nuevo, dos grandes líneas:
 - Modelos determinísticos (tipo "best estimate") que son de aplicación a los escenarios normales e incluso a los de evolución alterada y que suponen la utilización de un único conjunto de valores de los diferentes parámetros precisos (p. e. valores medios).
 - Modelos probabilísticos cuyo fundamento se encuentra tanto en el comportamiento no determinista del sistema o algunos de sus componentes (eventos climáticos, eventos geológicos, hábitos humanos, etc.), como en la necesidad de tratar de modo adecuado las incertidumbres consustanciales con la realización de los cálculos (el propio modelo como reflejo de la realidad, los procesos considerados, los parámetros del sistema, etc.). Estos modelos son empleados preferentemente para los

escenarios alterados o incluso para los catastróficos.

La aplicación de estas dos líneas conduce a conocer el comportamiento del sistema integrado y/o de sus componentes en una determinada configuración. Adicionalmente, el empleo de los modelos probabilísticos permite el desarrollo de técnicas de tratamiento de resultados que, debidamente combinadas con técnicas de análisis probabilísticos de fallos y progresión de eventos, supone una capacidad única de evaluar la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante los correspondientes análisis de incertidumbre y una posibilidad de orientar las ulteriores tareas de investigación y desarrollo mediante los oportunos análisis de sensibilidad.

En el mundo tecnológico y científico occidental existe un gran desarrollo en el área de la modelización utilizable para los proyectos de almacenamiento de residuos. Son cientos los modelos existentes para procesos particulares de alguno de los bloques del sistema completo, mientras que son, en cambio, pocos los modelos globales del sistema integrado existentes, pudiéndose citar como más destacados los siguientes:

Determinísticos

MELODIE (Francia) y NUTRAN (Estados Unidos).

Probabilísticos

SYVAC (Canadá u Reino Unidos) y LISA (CEE).

La evaluación de la Seguridad del almacenamiento

Como se indicó al principio, esta actividad supone, en definitiva, la contrastación de los resultados obtenidos con la aplicación de las técnicas y metodologías mencionadas en el punto anterior, contra unos criterios elaborados por la autoridad reguladora que resulten aceptables para la colectividad. Genéricamente, en los diversos países del mundo, se siguen las recomendaciones básicas de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en cuanto a la protección radiológica siguiente:

- **Justificación de la actividad.** Evidente en este caso, ya que los residuos existen por razón de las actividades aceptadas por cada país.
- **Optimización de las dosis colectivas**, lo que permite, en este caso, la elección de una entre diversas tecnologías u opciones de almacenamiento por cada país en función de sus especificidades.
- **Limitación de las exposiciones individuales**, lo que se traduce en una

de tres alternativas: limitar las dosis individuales al público; limitar el riesgo inducido a esa persona anónima, o limitar los efluentes radiactivos que se verterían al medio ambiente.

En lo que se refiere a la metodología a aplicar, ya se ha indicado más arriba la problemática existente en lo relativo a los almacenamientos de residuos radiactivos en medios geológicos profundos, que es de menor entidad en los llamados almacenamientos de superficie. Por lo que se refiere a los valores finales aceptables, no existe hoy una universalización de los mismos, fluctuando el límite del riesgo (ver punto "PA. Definición y descripción de los componentes del sistema" para definición de riesgo) total considerado inaceptable para el individuo crítico entre 10^{-5} y 10^{-7} por año, según diversos países y organismos supranacionales (Francia, Suiza, Suecia, Estados Unidos, Argentina, NEA, OIEA).

La sociedad, de hecho, acepta ciertos riesgos en su habitual progreso. Para este tipo de instalaciones de almacenamiento, deben asimismo establecerse unos *riesgos máximos admisibles* frente a los que poder comparar los valores obtenidos empleando la metodología que se indicó más arriba. En estas grandes definiciones, ENRESA debe promover un importante esfuerzo ya que, tras ellos, están los condicionantes básicos de su actividad.

A nivel internacional y en lo que se refiere al almacenamiento definitivo de residuos, se han hecho estudios globales de evaluación del comportamiento (incluyendo cálculos radiológicos) en diversos países (Suecia, Suiza, USA, Canadá, RFA), con alcance y niveles de aplicación diferentes. En Suiza, Suecia y Canadá se han orientado a demostrar genéricamente la viabilidad de tal almacenamiento, mientras que en los EE UU y la RFA se trata de estudios específicos, pero con un nivel preliminar de conocimiento de los parámetros de detalle del proyecto.

La comunidad tecnológica y científica internacional considera que deben llevarse a cabo ya estudios de impacto radiológico de proyectos de almacenamientos de residuos en aplicaciones específicas, que permitan contrastar los resultados teóricos de los modelos, con experiencias físicas concretas en el campo. En este sentido es de destacar el proyecto PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation System) que se lleva a cabo en la Comunidad Económica Europea, en un programa a seis años y que abarca tres emplazamientos reales en Bélgica, la RFA y Francia. De igual modo, se han puesto en marcha otros proyectos de cooperación internacional en el marco de la OCDE (NEA) tales como el PSAC

(Probabilistic Safety Analysis Codes Users Group) o el PAAG (Performance Assessment Advisory Group) que caminan en la línea de logro de acuerdos sobre criterios y metodologías a aplicar para las evaluaciones de estas instalaciones singulares.

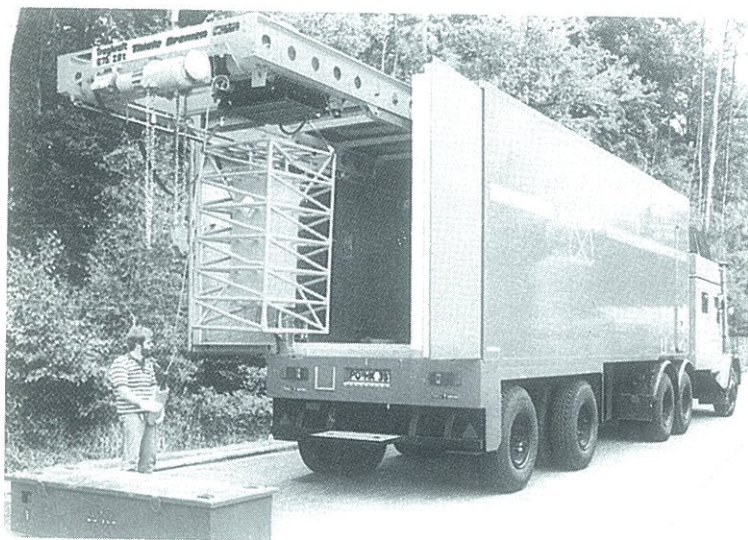
RESUMEN Y CONCLUSIONES

- El comportamiento de un sistema de almacenamiento es el resultado de la interacción entre tres bloques (campo próximo, campo lejano y biosfera), cuyo modo de respuesta requiere el empleo de modelos conceptuales y matemáticos que deben desarrollarse y el conocimiento de datos específicos de gran detalle de cada uno de los bloques.
- Todo este sistema produce la potencial liberación de isótopos radiactivos al medio ambiente, donde su presencia, evolución y efectos en los ecosistemas y el hombre pueden y deben ser calculados en términos de riesgos al individuo y a la sociedad.

- El comportamiento del sistema total debe conocerse, tanto en situación normal como en estimaciones accidentales previsibles con sus respectivas probabilidades. Esto conlleva el desarrollo de técnicas específicas de análisis probabilístico de fallos y una profundización neta en el conocimiento, tanto del residuo radiactivo y del medio geológico como de las interacciones entre sí, lo que supone un enorme reto. De igual modo debe profundizarse en el conocimiento de la evolución de los isótopos radiactivos en la biosfera y los mecanismos de incorporación a los ecosistemas y al hombre.
- Los riesgos calculados deben ser aceptables para la sociedad, para lo que deben estar *definidos los criterios* que se usarán para decretar tal aceptación mediante la reglamentación oficial oportuna y los acuerdos internacionales precisos sobre los mismos y las metodologías de cálculo a usar.
- Tras lo que antecede, y para el caso español, se estima la existencia de

cuatro áreas básicas de actividad cuya acometida contiene elementos de indudable interés tecnológico y científico.

- El desarrollo de *modelos* de representación del comportamiento de los almacenamientos: tanto a nivel de sus diversos componentes, como del sistema integrado y global.
- El desarrollo de técnicas probabilísticas de análisis, específicas para estas aplicaciones.
- El estudio de la *aplicación* de los modelos a los distintos tipos de emplazamientos y la utilización de los más adecuados para cada caso (almacenamiento alta actividad del combustible irradiado, almacenamiento baja actividad, diques de estériles de minería de uranio).
- La definición básica de los criterios de seguridad contra la que contrastar las evaluaciones de comportamientos de los almacenamientos de residuos radiactivos precisos en España.



TRANSNUCLEAR, S. A., empresa especializada en el transporte de materias radiactivas, con una experiencia de doce años, ofrece:

- Asesoramiento en la gestión de estos transportes (autorizaciones, homologación de bultos, seguros especiales nucleares, estudios logísticos, de criticidad, etc.).
- Servicios de transporte, terrestres, marítimos o aéreos, nacionales e internacionales, a su medida, con el apoyo de 17 oficinas en todo el mundo.

Para ello TRANSNUCLEAR, S. A., cuenta con:

- Modernos medios de transporte, envases, contenedores y protectores especiales, homologados internacionalmente, para cualquier tipo de carga, incluyendo líquidos radiactivos de baja, media y alta actividad.
- Personal especializado.
- Furgones acondicionados para el transporte de pequeñas cargas de residuos de instalaciones radiactivas, piezas contaminadas, pequeñas fuentes, radioisótopos, etc., así como los envases correspondientes.



Hermosilla, 57 - Télex 41366 - Madrid - Tels. 431 17 81, 431 83 23 y 435 36 13 Telefax 275 37 23