

AVANCES TÉCNICOS Y PERSPECTIVAS EN EL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE LARGA VIDA EN FORMACIONES GEOLOGICAS

TECHNICAL PROGRESS AND PERSPECTIVES IN THE GEOLOGIC DISPOSAL OF LONG-LIVED RADIOACTIVE WASTES

C. PESCATORE

El concepto del almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de larga vida en instalaciones construidas en formaciones geológicas consiste en desarrollar repositorios a gran profundidad que garanticen la seguridad, es decir, la resistencia a perturbaciones maliciosas o accidentales y la contención a lo largo de períodos muy prolongados. Este concepto se desarrolló tras un amplio proceso de consultas, de reflexiones y discusiones y de la consideración de otras opciones. El presente artículo pretende ofrecer una visión del estado de la técnica y una descripción sobre los últimos avances y tendencias desde la perspectiva de un planteamiento integral.

The concept of final long-lived radwaste storage in facilities built in geological formations involves the development of very deep repositories that ensure safety, i.e. that can withstand malicious or accidental disturbances throughout very long periods of time. This concept was developed after an extended period of review, reflection, discussion and consideration of other options. This article is intended to provide a vision of the state-of-the-art and a description of the latest breakthroughs and tendencies from the perspective of an integral approach.

INTRODUCCIÓN

Los residuos radiactivos de todo tipo se deben gestionar de forma responsable, con el fin de garantizar la seguridad y protección del público y del medio ambiente ahora y en el futuro. La tarea más compleja se refiere a la gestión de los residuos de larga vida que deben aislarse del entorno humano durante miles de años. La opción preferida para el emplazamiento definitivo de estos residuos consiste en introducirlos en repositorios construidos bajo tierra, a gran profundidad, en medios geológicos cuidadosamente seleccionados.

El concepto del almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de larga vida en instalaciones construidas en formaciones geológicas consiste en desarrollar repositorios a

gran profundidad que garanticen la seguridad, es decir, la resistencia a perturbaciones maliciosas o accidentales y la contención a lo largo de períodos muy prolongados. Este concepto se desarrolló tras un amplio proceso de consultas, de reflexiones y discusiones y de la consideración de otras opciones.

Las formaciones geológicas candidatas se eligen por su estabilidad a largo plazo, su capacidad de albergar un repositorio para el almacenamiento de los residuos y su capacidad de evitar o seriamente atenuar cualquier eventual liberación de radiactividad. Esta barrera natural viene reforzada por un sistema tecnológico diseñado para proporcionar la contención primaria física y química de los residuos. Así, el sistema en su totalidad está diseñado para asegurar que no vuelva al entorno

INTRODUCTION

Radioactive wastes of all kinds need to be managed responsibly to ensure public safety and protection of the environment now and in the future. The most challenging task involves managing the long-lived waste that must be isolated from the human environment for many thousands of years. The preferred option for eventual disposal is emplacement in repositories engineered deep underground in well-chosen geologic media.

The concept of engineered geologic disposal of long-lived radioactive waste involves deep underground repositories that ensure security, i.e. resistance to malicious or accidental disturbance, and containment of the waste over a very long time. The concept was developed after wide-ranging consultations, substantial thought and discussion, and consideration of other options.

Potential host geologic formations are chosen for their long-term stability, their ability to accommodate a waste disposal facility, and their ability to prevent or severely attenuate any eventual release of radioactivity. This natural safety barrier is reinforced by an engineered system designed to provide primary physical and chemical containment of the waste. The whole system is thus designed to ensure that no significant radioactivity from the waste returns to the surface environment and that no burden in terms of maintenance is placed on future generations.

Since the geologic disposal concept was proposed, research and development efforts worldwide have increased understanding of how underground disposal facilities will function over very long periods of time, and have enhanced confidence in the ultimate safety of the concept. In recent years, as the concept itself is nearing implementation in several countries, support is being voiced in some quarters for postponement of disposal and for a serious review of alternative waste management options. On the other hand, international groups of technical experts have repeatedly confirmed that geologic disposal is ethical, environmentally sound and safe, and other management options are, at most, complementary to geologic

de la superficie ninguna cantidad significativa de radiactividad y que no se deje para las generaciones futuras ninguna carga en términos de su mantenimiento.

Desde que se propusiera el concepto del almacenamiento definitivo en formaciones geológicas, los esfuerzos de investigación y desarrollo realizados en todo el mundo han mejorado nuestra comprensión de cómo funcionarían las instalaciones subterráneas de almacenamiento a lo largo de períodos muy largos, y han servido para aumentar la confianza en la seguridad del concepto. En los últimos años, conforme el concepto ha ido aproximándose a la fase de implantación en muchos países, algunos colectivos han abogado por el aplazamiento del almacenamiento definitivo y por una revisión sería de opciones de gestión de residuos alternativas. Por otra parte, grupos internacionales de expertos técnicos han confirmado repetidas veces que el almacenamiento definitivo en formaciones geológicas es ética y medioambientalmente sólido y seguro, y que las otras opciones en materia de gestión constituyen, en el mejor de los casos, un complemento a este tipo de almacenamiento, pero nunca una alternativa completa a largo plazo.

Se requiere un amplio abanico de actividades técnicas para llevar el almacenamiento definitivo a la práctica: los residuos se deben acondicionar y almacenar temporalmente, hay que desarrollar contenedores duraderos, habrá que seleccionar y caracterizar los emplazamientos, evaluar la seguridad, solicitar (y conceder) licencias y construir, operar y finalmente clausurar la instalación. Uno de los servicios prestados a los países miembros por la Agencia de la Energía Nuclear (AEN) de la OCDE en el campo del almacenamiento definitivo geológico de los residuos radiactivos de larga vida es el seguimiento de los avances habidos y la revisión del estado del arte. Estudios recientes de la AEN subrayan que se ha avanzado en muchas de estas actividades. En particular, se observan avances en la ciencia y tecnología necesarias para soportar la evaluación de la seguridad y la implantación de este tipo de almacenamiento. Es de destacar el cambio hacia



Vista aérea de WIPP (EE.UU.)

Aerial view of WIPP (USA).

evaluaciones de la seguridad que hacen hincapié en aspectos relacionados con la confianza y que reconocen el papel de estos estudios como apoyo al enfoque de desarrollo de repositorios mediante un proceso de toma de decisiones por pasos. En un plano más general, los aspectos relacionados con la confianza de los afectados no técnicos han aumentado en la última década, reflejando la tendencia de la sociedad hacia una democracia cada vez más participativa en los países de la OCDE. La identificación de procesos de toma de decisiones por pasos específicos a cada cultura nacional y el fortalecimiento de la participación de los afectados, de la transparencia y de una clara jerarquía de responsabilidad constituyen actualmente la frontera en el desarrollo de repositorios.

Son dos los importantes estudios de la AEN que revisan los desarrollos habidos en la última década en materia de almacenamiento definitivo en formaciones geológicas¹. [1, 2] Dos estudios más recientes se centran en el papel de los laboratorios subterráneos [3] y en los conceptos de la reversibilidad de las decisiones y de la recuperabilidad de los residuos. [4] Finalmente, el área relacionada con la justificación de la seguridad a largo plazo está especialmente bien cubierta, por ejemplo por los ejercicios IPAG [5, 6, 7], que proporcionan una base de datos y las lecciones aprendidas de la realización y revisión de estudios integrados de justificación de la seguridad, y por el documento "Confianza" de la AEN [8]. Otros documentos útiles que ayudan a

disposal rather than complete, long-term alternatives.

An extensive range of technical activities is needed to implement disposal: wastes must be conditioned and stored, long-lasting containers developed, sites chosen and characterised, safety assessed, licenses applied for (and granted), and the facility constructed, operated and finally closed. One of the services that the Nuclear Energy Agency (NEA) of the OECD provides to the Member countries in the field of geologic disposal of long-lived radioactive wastes is the monitoring of progress and review of the state of the art. Recent NEA studies observe that progress has been made in many of these activities. In particular, advancements are noted in the science and technology necessary to underpin the safety assessment and implementation of geologic disposal. Worthy of note is the shift towards safety assessments that emphasise confidence aspects and recognise the supporting role of these studies to the step-wise decision-making approach to repository development. More in general, aspects related to confidence by the non-technical stakeholders have risen in importance in the last decade within the general societal trends towards a more and more participatory democracy in OECD countries. The identification of step-wise decision making processes specific to each country culture and the strengthening of participation of stakeholders, transparency, accountability constitute nowadays the frontier in repository development.

Two major NEA studies review developments in the past decade in the field of geologic disposal¹. [1, 2] Two more recent studies focus on the role of underground laboratories [3] and on the concepts of reversibility of decisions and retrievability of the waste. [4] Finally, the area related to the long-term safety case is especially well covered, e.g. through the IPAG exercises [5, 6, 7], which provide a data base of, and lessons learnt from, the conduct and review of integrated safety cases, and the NEA "Confidence" document [8]. Other useful documents to help assess progress are the NEA reviews of the ethical aspects of disposal [9], of strategic areas in waste management [10], and of issues of stakeholder confidence. [11] General progress and lessons learnt at the technical level over the past 10 years are

¹ El estudio "Revisión de los desarrollos habidos en la última década" se está traduciendo al español (contacto: C. Ruiz, CSN).

¹ The study "... Review of developments in the last decade" is being translated in Spanish (contact: C. Ruiz, CSN)

summarised hereafter, with some attention given also to higher level findings. The reader is advised to consult the NEA original references for additional details.

REVIEW OF TECHNICAL PROGRESS

• Experience in laboratory and field experiments, including study of natural analogues

Comprehensive scientific research programmes have been established to study safety-relevant processes under the particular conditions that may pertain for geologic repositories. This includes phenomena as diverse as metallic corrosion, evolution of clay properties, solute migration in different media, chemical sorption and long-term climate change. Natural analogue studies involve examining processes occurring in nature similar to those that would determine the long-term behaviour of a repository. They are seen as especially valuable in the building of confidence, since they allow a check of our understanding of processes that are too slow, or too large in scale, to be directly measured in the laboratory or the field.

• Construction and operation of underground rock laboratories

R&D work has been carried out in more than ten facilities world-wide, at locations that are not foreseen as repository sites, but may nevertheless provide relevant information. In addition, a few underground rock laboratories are located at potential deep repository sites. Such laboratories provide the environment for developing and proving underground engineering methods and invaluable data for the testing of scientific and mathematical models used in safety assessment. They can also provide practical demonstrations that can improve confidence of all those who observe their operation, and have acted as centres for promoting international co-operative research projects.

• Experience in site characterisation

Ten years ago, few data were available from potential geologic disposal sites and environments, and data collection strategies and methods were less developed. Today, extensive programmes involving detailed characterisation with geophysics, numerous boreholes, and even exploratory shafts and ramps have been carried out at sites in several countries, including Belgium, Canada, Finland, France, Germany, Sweden, Switzerland, the UK and the USA. Valuable experience has also been gained in using geological data to understand the expected safety performance of the sites.

• Development of engineered barrier design

Partly in response to the perceived difficulty of adequately characterising certain geologic environments, more attention has been focused in the past ten years on developing so-called robust engineered barrier systems. These are systems which, by a combination of physical barriers and chemical controls, can confidently be expected to provide a high level of long-term containment while making relatively few demands on the characteristics of the

evaluar el progreso son las revisiones por parte de la AEN de los aspectos éticos del almacenamiento definitivo [9], de temas estratégicos en la gestión de residuos [10] y de temas relacionados con la confianza de las partes afectadas. [11]. Los avances generales y las lecciones aprendidas a nivel técnico en los últimos 10 años se resumen a continuación, con atención también a hallazgos a niveles superiores. Se aconseja al lector que se remita a las referencias originales de la AEN para detalles adicionales.

REVISIÓN DEL PROGRESO TÉCNICO

• Experiencias de experimentos de laboratorio y de campo, incluido el estudio de los análogos naturales

Se han establecido amplios programas de investigación científica con el fin de estudiar procesos de relevancia para la seguridad bajo las condiciones específicas que podrían darse en los repositorios geológicos. Estos incluyen fenómenos tan diversos como la corrosión de los metales, la evolución de las propiedades de las arcillas, la migración de solutos en distintos medios, la sorción química y el cambio climático a largo plazo. Los estudios de análogos naturales examinan procesos que ocurren en la naturaleza similares a los que determinarían el comportamiento a largo plazo de un repositorio. Estos estudios se consideran especialmente valiosos para aumentar la confianza, toda vez que permiten comprobar nuestra comprensión de procesos que son demasiado lentos o de una escala demasiado grande para ser medidos directamente en el laboratorio o en el campo.

• Construcción y operación de laboratorios subterráneos en roca

Se ha realizado trabajos de I+D en más de diez instalaciones a través del mundo, instalaciones que no se prevén como emplazamientos para un repositorio pero que proporciona información relevante. Además, algunos laboratorios subterráneos en roca se encuentran en emplazamientos que sí son potenciales emplazamientos. Estos laboratorios proporcionan un entorno para el desarrollo y verificación de métodos de ingeniería en entornos subterráneos, así como valiosos datos para la comprobación de los

modelos científicos y matemáticos que se utilizan en la evaluación de la seguridad. También permiten efectuar demostraciones prácticas que pueden aumentar la confianza entre todos aquellos que observan su operación, y han actuado como centros para la promoción de proyectos cooperativos de investigación a nivel internacional.

• Experiencia de la caracterización de emplazamientos

Hace diez años se disponía de pocos datos sobre los potenciales emplazamientos y entornos para el almacenamiento definitivo en formaciones geológicas, y los métodos y estrategias utilizados para la adquisición de datos estaban menos desarrollados. Actualmente, se han llevado a cabo amplios programas de caracterización detallada mediante métodos geofísicos, numerosos sondeos y hasta pozos y rampas exploratorias en varios países, entre ellos Bélgica, Canadá, Finlandia, Francia, Alemania, Suecia, Suiza, Gran Bretaña y Estados Unidos. También se ha adquirido una valiosa experiencia en el uso de datos geológicos para comprender mejor el rendimiento esperado de los emplazamientos en relación con la seguridad.

• Desarrollo del diseño de las barreras tecnológicas

Como respuesta, en parte, a las dificultades percibidas para la caracterización adecuada de determinados entornos geológicos, se ha prestado una mayor atención en los últimos diez años al desarrollo de los llamados sistemas de barreras tecnológicas robustas. Estos son sistemas que, mediante la combinación de barreras físicas y controles químicos, ofrecen una confianza en cuanto a su capacidad de garantizar un alto grado de contención a largo plazo con solicitudes relativamente reducidas en cuanto a las características de la roca hospedante. Por otra parte, en algunos programas en los cuales se han investigado emplazamientos reales, se ha aplicado un alto nivel de refinamiento para adaptar el diseño de las barreras tecnológicas a las características reales del emplazamiento.

• Mejora de las técnicas de evaluación de la seguridad

Junto con una mejor comprensión científica y con datos procedentes

de estudios experimentales, se han aplicado unos modelos matemáticos mejorados y unas técnicas avanzadas de computación que facilitan representaciones más realistas del comportamiento potencial de los sistemas de almacenamiento geológico y de sus componentes, representaciones que además inspiran una mayor confianza. Asimismo, ha habido desarrollos en técnicas que promueven una amplia consideración de las características, sucesos y procesos relevantes y que permiten organizar y presentar los cálculos de las evaluaciones de seguridad. Se ha conseguido un más amplio reconocimiento de la importancia e inevitabilidad de distintos tipos de incertidumbres, por ejemplo debidas a la falta de conocimiento detallado o a datos insuficientes, y se han desarrollado métodos para el manejo de tales incertidumbres. Así, en términos generales existe una mayor confianza en que los resultados de evaluaciones basadas en tales métodos, modelos y datos constituyan una base fiable para juzgar la aceptabilidad de un emplazamiento y del diseño de un repositorio desde el punto de vista de la seguridad.

• **Cambio hacia justificaciones de la seguridad que documentan la confianza**

Las decisiones de los especialistas técnicos y jefes de una organización que vaya a implantar un repositorio, y de las autoridades reguladoras responsables de supervisar sus actividades, requerirán unos argumentos técnicos que generen confianza en la viabilidad y seguridad a largo plazo de los conceptos propuestos. Otras decisiones pueden ser la responsabilidad de los encargados de la toma de decisiones políticas y del público en general (por ejemplo, mediante referéndum locales). Estos participantes no técnicos también anhelan tener confianza en los aspectos técnicos del desarrollo de un repositorio, aunque tal confianza quizá esté basada en argumentos menos técnicos y más cualitativos². En este contexto, se están desarrollando justificaciones de la seguridad que sirvan de base para el diálogo entre los distintos afectados y

para la toma de decisiones. Esto ha necesitado un cambio en la forma de pensar de los técnicos y la implantación de procedimientos para asegurar la transparencia y trazabilidad de la documentación, consultas más frecuentes con los interesados y el desarrollo y comunicación de argumentos a favor de la confianza.

• **Mejor integración de la caracterización del emplazamiento, del diseño y de la evaluación de la seguridad**

El citado progreso en la adquisición de datos, la comprensión científica y la modelación cuantitativa ha permitido avanzar en la comprensión del comportamiento de los componentes del sistema de almacenamiento definitivo en formaciones geológicas y de sus respectivos papeles en distintos tipos de rocas, y también en diferentes circunstancias específicas al emplazamiento. Este progreso, junto con una mejor integración y control de la caracterización y con programas de diseño centrado en los requisitos de la evaluación de la seguridad, ha permitido enfocar mejor estas actividades.

• **Desarrollo de marcos reguladores, incluidos requisitos de cumplimiento**

En la mayoría de los países que con el tiempo tendrán que recurrir al almacenamiento geológico, existen ya guías reguladoras que establecen los principios y requisitos específicos de este tipo de almacenamiento. En varios países se han establecido también requisitos específicos a un determinado emplazamiento y/o información más detallada sobre la forma en que el responsable del desarrollo de un repositorio tendrá que demostrar el cumplimiento. En numerosos países se ha establecido un proceso de intercambio entre el regulador y el responsable del desarrollo, incluida la revisión de las actividades de investigación de este último y evaluaciones de seguridad iterativas. Además, se ha adquirido experiencia del proceso de cumplimiento a través del proceso de licenciamiento de instalaciones de almacenamiento de residuos de baja y media actividad, y la revisión de los

host rock. On the other hand, in some programmes where actual sites have been investigated, a high level of refinement has been applied to adapt the engineered barrier design to actual site characteristics.

• **Improvement of safety assessment techniques**

Together with an improved scientific understanding and data from experimental studies, improved mathematical models and advanced computing techniques have been applied that provide representations of the potential behaviour of geologic disposal systems and their components that are more realistic, and in which more confidence can be placed. Developments have also been made in the techniques for promoting comprehensive consideration of the relevant features, events and processes and for organising and presenting safety assessment calculations. A fuller recognition has been achieved of the importance and inevitability of different types of uncertainty, e.g. due to lack of detailed knowledge or sparse data, and methods have been developed for handling these uncertainties. Thus, overall, there is more confidence that the results of assessments that employ such methods, models and data are a reliable basis for judging the acceptability of a repository site and design from the point of view of safety.

• **Shift towards safety cases that document confidence**

The decisions that are the responsibility of technical specialists and managers within an implementing organisation, and the regulatory bodies that oversee their activities, will require technical arguments that give confidence in the feasibility and long-term safety of the proposed concepts. Other decisions may be the responsibility of political decision-makers and the general public (e.g. in local referendums). These non-technical stakeholders also require confidence in the technical aspects of repository development, but this confidence may be based on less technical, more qualitative arguments². Thus safety cases are being developed to serve as a basis of dialogue amongst different stakeholders and as a basis for decision-making. This has required a shift in technical thinking and the implementation of procedures to ensure traceability and transparency of documentation, more frequent consultation with stakeholders, and the development and communication of confidence arguments.

• **Improved integration of site characterisation, design and safety assessment**

The above-noted progress in data collection, scientific understanding and quantitative modelling has allowed advances to be made in the understanding of the performance of geologic disposal system components and their respective roles in different rock types and, also in different site-specific

² Es probable que la confianza de estos grupos en los aspectos técnicos del desarrollo de un repositorio esté estrechamente relacionada, por ejemplo, con la credibilidad de las organizaciones de implantación y reguladoras. Esto a su vez será más probable si la comunidad científica en general presta su apoyo a los argumentos técnicos de estas organizaciones.

² Confidence of these groups in the technical aspects of repository development is likely, for example, to be closely related to the credibility of the implementing and regulatory organisations. This, in turn, is more likely to be achieved if support for the technical arguments of these organisations can be gained in the wider scientific community.

circumstances. This progress, together with better integration and control of characterisation and design programmes focused on the requirements of safety assessment, has allowed better direction of these activities.

- **Development of regulatory frameworks, including requirements for compliance**

In most countries with a need for eventual geologic disposal, regulatory guidelines are now in place that set out principles and specific requirements for underground disposal. In several countries, site-specific requirements have also been set and/or more detailed guidance given on the manner in which the developer of a repository will be expected to demonstrate compliance. A process of regulator-developer exchange has been established in many countries, including review of the developer's research activities and iterative safety assessments. In addition, experience of the compliance process has been gained through the licensing process for facilities for disposal of low and medium-level wastes, and through the review of safety studies in support of decision-making at various stages of development of deep geological repositories.

SOME HIGHER-LEVEL FINDINGS

On the following principal points, there is widespread agreement amongst those directly involved in waste management, be they developers, regulators, or policy makers.

- **Long-lived radioactive waste exists. Of the various disposal options considered, deep geologic disposal is the most appropriate means of long-term management.**

A range of alternatives to disposal has been reviewed in the past and found to be wanting in some respect. On the other hand, geologic disposal conforms to ethical concerns, is technically feasible, and has been judged to provide a high degree of public safety, security from malicious intervention, and protection of the environment both in the short and long term. Also, as understanding has increased, no radical changes in philosophy of approach have proven to be necessary, confirming the soundness of the basic geologic disposal concept. Partitioning and transmutation would not remove the need to dispose permanently of long-lived waste.

- **There is a high level of confidence amongst the scientific and technical community engaged in waste disposal that geologic disposal is technically safe.**

This is a consequence of the many years of work by numerous professionals in institutions around the world. There has been an extremely free exchange of information and knowledge between these professionals and there has been a strong tradition of open documentation available for peer and public review. The common perception amongst the public that there is a strong body of technical opinion challenging the feasibility of safe disposal does not reflect the realities of the debate. The number of sceptics is relatively small in the broader technical community, whereas there is a wide consensus on the safety and benefits of geologic disposal within

estudios de seguridad utilizados para la toma de decisiones en distintas fases del desarrollo de repositorios geológicos profundos.

ALGUNOS HALLAZGOS DE MÁS ALTO NIVEL

Existe un amplio consenso sobre los siguientes puntos importantes entre los directamente involucrados en la gestión de residuos, ya sean los responsables del desarrollo, los reguladores o los encargados del desarrollo político:

- **Los residuos radiactivos de larga vida existen. De las distintas opciones consideradas en materia del almacenamiento definitivo, el almacenamiento geológico profundo es la más apropiada para la gestión a largo plazo.**

En el pasado se han revisado una serie de alternativas para el almacenamiento definitivo, las cuales han demostrado ser insuficientes de algún modo. El almacenamiento geológico, sin embargo, satisface las cuestiones éticas y es técnicamente viable, y además se considera que proporciona un alto grado de seguridad pública, seguridad contra intervenciones maliciosas y la protección del medio ambiente a corto y largo plazo. Además, conforme ha ido aumentando nuestra comprensión, no ha demostrado ser necesario ningún cambio radical en la filosofía del enfoque, lo cual confirma la solidez del concepto básico del almacenamiento geológico. La separación y transmutación no eliminarían la necesidad de almacenar permanentemente los residuos de larga vida.

- **Existe en la comunidad científica y técnica que participa en el almacenamiento definitivo de los residuos un alto grado de confianza en que el almacenamiento geológico es técnicamente seguro.**

Esta confianza es fruto de los muchos años de trabajo invertido por numerosos profesionales en instituciones de todo el mundo. Ha habido



Galería subterránea del almacenamiento de WIPP (EE.UU.)

Underground gallery of WIPP (USA).

entre estos profesionales un intercambio de información extremadamente libre, y una fuerte tradición de documentación abierta disponible para su revisión por los homólogos y el público. La amplia percepción por parte del público de que existe una fuerte opinión técnica que cuestiona la viabilidad del almacenamiento seguro no refleja la realidad del debate. El número de escépticos es relativamente reducido en la comunidad técnica en general, y en la comunidad técnica de los expertos en la gestión de residuos existe un amplio consenso sobre la seguridad y los beneficios del almacenamiento geológico.

- **Sin embargo, el gran público no comparte necesariamente el alto grado de confianza que existe en la comunidad científica y técnica.**

Como es menester, los desarrollos relacionados con el almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos se someten al minucioso escrutinio de las autoridades reguladoras y de planificación. Además, habida cuenta de su dimensión ética y política, son objeto de una discusión más amplia y menos técnica. El público en general tiene reservas en cuanto a la aceptación irreversible de una acción cuyas consecuencias no se comprenden del todo. La falta de confianza entre el público también puede estar relacionada con la desconfianza en la seguridad de la energía nuclear, y a veces con una abierta oposición a esta fuente energética y a las organizaciones involucradas en ella, o incluso con una falta generalizada de confianza en el desarrollo científico. La conexión entre la energía nuclear y la gestión de los residuos radiactivos es algo que se debe discutir.

• ***El marco cronológico que se ha considerado en el pasado para el almacenamiento definitivo geológico era excesivamente optimista.***

Esto era debido en parte al optimismo técnico, especialmente en lo relativo a la dificultad de caracterizar adecuadamente los entornos geológicos profundos, pero ante todo se debía a una subestimación de las dimensiones política, pública y reguladora de los proyectos de almacenamiento definitivo. Desde el punto de vista técnico, no ha habido una necesidad urgente de disponer de instalaciones de almacenamiento definitivo debido al alto y reconocido grado de seguridad de las instalaciones de almacenamiento temporal, a los volúmenes relativamente reducidos de los residuos de larga vida procedentes de los programas civiles y al tiempo de almacenamiento necesario anteriormente al almacenamiento geológico para que los residuos más radiactivos puedan enfriarse de forma adecuada.

• ***Existe la necesidad de trabajos científicos continuados y de alta calidad.***

Aunque la tecnología del almacenamiento geológico está bien desarrollada y se considera lo suficientemente madura como para proceder a su despliegue, su futuro refinamiento, verificación, demostración, implantación y control de calidad bajo condiciones de referencia son tareas desafiantes que se extenderán a lo largo de décadas.

• ***Existe la necesidad de una política coherente y de unos marcos reguladores estrictos, con puntos de decisión identificados y que permitan el diálogo público.***

Al igual que para cualquier proyecto polémico, independientemente de su naturaleza, el apoyo universal o aplastante no es un objetivo realista. Por otra parte, la sociedad debe tener la certeza de que cada decisión tomada se haya considerado debidamente. Para proyectos tan complejos y prolongados, se requiere un proceso de toma de decisiones que se caracterice por unos hitos intermedios y puntos de decisión. Este proceso de toma de decisiones por pasos debe brindar oportunidades para que todos los grupos afectados e interesados puedan ofrecer sus comentarios y contribuciones, y debe incluir rigurosas

revisiones técnicas y la discusión de tópicos de la elección del público. En particular, la comunidad de almacenamiento de residuos debe estar dispuesta a discutir los méritos de otras estrategias, incluida una mayor flexibilidad en la implantación del almacenamiento definitivo geológico. Avanzar por pasos hacia la implantación del almacenamiento geológico profundo aseguraría que la decisión de implantar plenamente esa opción no se tomara irreversiblemente en una de las fases, y permitiría identificar y desarrollar otras opciones. En última instancia, los gobiernos tienen la responsabilidad de tomar decisiones que gocen de un nivel apropiado de apoyo público y que proporcionen un marco para la realización de las acciones necesarias.

• ***La reversibilidad de las decisiones tomadas y la recuperabilidad de los residuos constituyen una importante área estratégica para un desarrollo posterior.***

La reversibilidad se refiere a la posibilidad de invertir uno o más pasos en la planificación o desarrollo del repositorio en cualquier etapa del programa, mientras que la recuperabilidad se refiere a la posibilidad de invertir el proceso de emplazamiento de los residuos. La reversibilidad y la recuperabilidad se están discutiendo y definiendo actualmente en los programas nacionales de numerosos países y de momento sigue habiendo distintas opiniones en cuanto a su oportunidad y sobre los métodos y el alcance de su implantación. Algunas organizaciones de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos creen que incorporar los conceptos de la reversibilidad y recuperabilidad aumentará el nivel de flexibilidad de sus programas, y, por tanto, su capacidad de responder a cambios en la información técnica y factores políticos. También se considera importante en cuanto al reconocimiento de las preocupaciones éticas y que puede contribuir a una más amplia confianza por parte de la sociedad en la opción del almacenamiento geológico por medios tecnológicos. No obstante, la reversibilidad de las decisiones y la recuperabilidad de los residuos se deben unir a otras opciones, toda vez que la reversibilidad implica la inversión del proceso y la aplicación de otro, y los residuos no se deben recuperar a menos que exista otra solución para su

the technical community of waste management experts.

• ***The broader public, however, does not necessarily share the high level of confidence of the scientific and technical community.***

Developments related to radioactive waste disposal are correctly subjected to detailed scrutiny by regulatory and planning authorities. Furthermore, because of ethical and political dimensions, they are a subject of wider-reaching and less-technical discussion. There are reservations in the broader public towards committing irreversibly to an action whose consequences are not fully understood. Lack of confidence by part of the public may also be connected to a lack of confidence in the safety of nuclear power, and sometimes to outright opposition to nuclear power and associated organisations, or even to a general lack of trust in scientific developments. The connection between nuclear power and radioactive waste management must be discussed.

• ***The time-scales envisaged in the past for implementation of geologic disposal were too optimistic.***

This was partly due to technical optimism, especially with regard to the difficulty of adequately characterising deep geologic environments, but was mainly due to an underestimation of the political, public and regulatory dimensions of disposal projects. From a technical point of view, there has been no urgent need for final disposal facilities because of the recognised high level of safety of interim storage facilities, the relatively small volumes of long-lived radioactive waste from civilian programmes, and the storage time needed to allow adequate cooling of the more radioactive waste before geologic disposal can take place.

• ***There is a need for continued, high-quality scientific and technical work.***

Although the technology for geologic disposal is well developed and is considered mature enough for deployment, its further refinement, testing, demonstration, implementation and quality control under reference conditions are challenging tasks extending over decades.

• ***There is a need for coherent policy and strict regulatory frameworks, with identified decision points, which also allow for public dialogue.***

As for controversial projects of any nature, universal or overwhelming support is not a realistic aim. On the other hand, society must be assured that every decision taken is carefully considered. A decision-making process characterised by intermediate milestones and decision points is necessary for such complex, long-term projects. This process of step-wise decision-making should allow opportunities for comment and input from all affected and interested groups, and should include rigorous technical reviews and the discussion of topics of the public's choice. In particular, the waste disposal community must be ready to discuss the merits of other waste management strategies, including improving flexibility in the implementation of

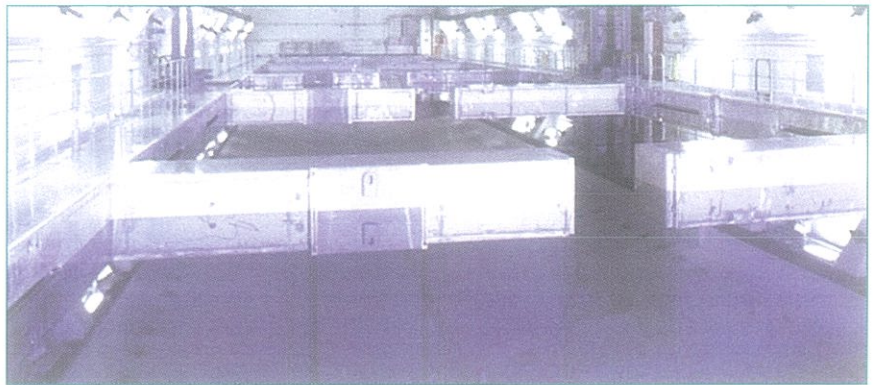
geologic disposal. Moving ahead in a step-wise fashion towards implementation of deep disposal would assure that a decision to implement disposal fully is not taken irreversibly in one step and would allow the identification and development of other options. Ultimately, governments are responsible for making decisions that meet with an appropriate level of public support and provide the framework in which the necessary actions can be taken.

- **Reversibility of decision-making and retrievability of the waste constitute an important strategic area for further development.**

Reversibility denotes the possibility of reversing one or a series of steps in repository planning or development at any stage of the programme, while retrievability denotes the possibility of reversing the action of waste emplacement. Reversibility and retrievability are currently being discussed and defined within the national programmes of several countries and there are, as yet, varying views on the desirability and the methods and degree of their implementation. Some radioactive waste disposal organisations believe that incorporating the concepts of reversibility and retrievability will increase the level of flexibility in their programmes and, thus, their ability to respond to changes in technical information and policy factors. It is also considered important to recognise ethical concerns, and may contribute to achieving wider societal confidence in the engineered geologic disposal option. Reversibility of decisions and retrievability of the waste must be coupled with other options, however, as reversibility implies reversal to follow some other course, and waste should not be retrieved unless an alternative, more acceptable, waste management solution is available. In particular, retrievability is not introduced to improve the long-term passive safety of a repository and is not a primary goal in waste disposal concepts, but only a preference that favours flexibility. The introduction of measures to facilitate retrievability does not lessen the need for thorough safety assessments and assurance of operational and long-term safety and security of a repository.

- **Stakeholder confidence**

Any significant decisions regarding the long-term management of radioactive waste will be accompanied by a comprehensive public review with involvement by a diverse range of stakeholders. These stakeholders will include not just the waste generators, waste-management agencies, and regulatory authorities, all of whom have a primarily technical focus, but also interested or concerned parties with a non-technical focus such as local communities, elected officials, and the general public. Because any waste-management project is much more likely to move forward when it has the consent and approval of these non-technical stakeholders, the participation of these stakeholders in the decision-making process is of critical importance. Waste-management organisations need additional interaction with civil society focusing not on changing the mindset of others, but on learning how to change their own approach and mindset to interact more effectively with stakeholders. At a broader level, trends towards participatory democracy are more and more evident in OECD countries and the strengthening of participation of stake-



Almacenamiento de combustible gastado en húmedo, CLAB (SKB, Suecia).

CLAB spent fuel storage facility (SKB, Sweden).

gestión que sea aceptable. En particular, la recuperabilidad no se introduce al objeto de mejorar la seguridad pasiva a largo plazo del repositorio y no es un objetivo principal de los conceptos de almacenamiento definitivo, sino sólo una preferencia que favorece la flexibilidad. La introducción de medidas para facilitar la recuperabilidad no reduce la necesidad de rigurosas evaluaciones de la seguridad y de una garantía de la seguridad y protección física del repositorio durante su operación y a más largo plazo.

- **Confianza de los afectados**

Toda decisión significativa sobre la gestión a largo plazo de los residuos radiactivos irá acompañada de una amplia revisión pública, con la participación de un abanico de afectados. Éstos no serán sólo los productores de los residuos, las agencias de gestión de residuos y las autoridades reguladoras, todos los cuales tienen un enfoque mayoritariamente técnico, sino también otras partes interesadas o afectadas no técnicas, como las comunidades locales, los representantes elegidos y el público en general. Dado que cualquier proyecto de gestión de residuos tiene mayor probabilidad de avanzar si cuenta con el consentimiento y aprobación de estos afectados no técnicos, su participación en el proceso de toma de decisiones es de vital importancia. Las organizaciones de gestión de residuos necesitan una mayor interacción con la sociedad civil, enfocada no tanto hacia cómo cambiar el punto de vista de los demás, sino más hacia cómo cambiar su propio enfoque y punto de vista, a fin de poder interactuar con mayor eficacia con los interesados. En un ámbito más amplio, se están haciendo cada vez más evidentes una tendencias hacia una democracia más participativa

en los países de la OCDE, y el fortalecimiento de la participación de los interesados, de la transparencia, de una jerarquía de responsabilidades y, en última instancia, de la efectividad de las políticas en los países miembros son importantes áreas para el desarrollo en la OCDE.

CONCLUSIONES

En términos generales, el esfuerzo científico y técnico realizado a nivel nacional e internacional en las últimas décadas es de una amplitud y profundidad considerables. Se han invertido importantes recursos e investigado muchas avenidas con el fin de asegurar la disponibilidad de sólidas soluciones técnicas, basadas en una profunda comprensión científica. Aunque la tecnología del almacenamiento geológico está bien desarrollada, su futuro refinamiento, verificación, demostración, implantación y control de calidad bajo condiciones de referencia son tareas desafiantes que se extenderán a lo largo de décadas.

En particular, aunque los métodos actualmente disponibles para la evaluación del comportamiento a largo plazo han demostrado ser adecuados para la evaluación de los impactos a largo plazo de un repositorio geológico profundo, sigue habiendo oportunidades de mejora específicas en la evaluación de la seguridad y en las justificaciones de la seguridad en general. Existe, por ejemplo, la oportunidad de desarrollar de una forma más amplia la transparencia y la trazabilidad, para una mejor consideración de la caracterización de emplazamientos y la evaluación del comportamiento, de desarrollar más el tratamiento de la variabilidad y de la incertidumbre y también de desarrollar una comprensión más profunda en términos

generales. Por otra parte, existe la necesidad de estructurar los programas y estudios de seguridad nacionales de forma que se ponga énfasis en los aspectos de la confianza. La confianza entre las partes interesadas, tanto las técnicas como las no técnicas, es una preocupación y una meta que requiere que avancemos hacia unas decisiones ampliamente respaldadas y robustas en lo técnico y lo no técnico.

REFERENCIAS

[1] Geological Disposal of Radioactive Waste: review of Developments in The Last Decade (*El Almacenamiento Geológico de los Residuos Radiactivos: revisión de desarrollos en la Última Década*), AEN, París, 1999 (en imprenta).

[2] Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? - An International Assessment (*El Progreso hacia el Almacenamiento Geológico de los Residuos Radiactivo: ¿Dónde estamos? - Una Evaluación Internacional*), AEN, París, 1999.

[3] Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes (*Los Laboratorios Subterráneos en los Programas de Almacenamiento Definitivo de Residuos Nucleares*), AEN, París, 2001 (en fase de finalización).

[4] Considering Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste (*Consideraciones en materia de reversibilidad y Recuperabilidad en el Almacenamiento Geológico de los Residuos Radiactivos*) AEN, París, 2001 (en fase de finalización).

[5] Lessons Learnt from Ten

Performance Assessment Studies (*Lecciones Aprendidas de Diez Estudios de Evaluación de Comportamiento*), AEN, París, 1997.

[6] Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories (*Revisiones Regulatorias de Evaluaciones de Repositorios Geológicos Profundos*), AEN, París, 2000.

[7] Approaches and Arguments to Establish and Communicate Confidence in Safety and the Overall Results of Integrated performance Assessments (*Enfoques y Argumentos para el Establecimiento y Comunicación de la Confianza en los Resultados Globales de las Evaluaciones Integradas del Comportamiento*), AEN, París, 2001 (en fase de finalización).

[8] Confidence in the Long-term Safety of Deep "Geological Repositories - Its Development and Communication (*La Confianza en la Seguridad a Largo Plazo de los Repositorios Geológicos Profundos. Su Desarrollo y Comunicación*), AEN, París, 1999.

[9] The Environmental and Ethical Basis of geological Disposal - A Collective Opinion (*La Base Medioambiental y Ética del Almacenamiento Geológico - Una Opinión Colectiva*), París, 1995.

[10] Strategic Areas In Radioactive Waste Management (*Áreas Estratégicas de la Gestión de los Residuos Radiactivos*), AEN, París, 1999.

[11] Stakeholder Confidence and Radioactive Waste Disposal, Workshop Proceedings (*La Confianza de las Partes Interesadas en el Almacenamiento Definitivo de los Residuos Radiactivos, Transacciones de Taller*), AEN, París, 2000.

holders, transparency, accountability, and, ultimately, policy effectiveness in Member countries constitute major areas of development within the OECD.

CONCLUSIONS

Overall, the scientific and technical effort that has been made at national and international level, in the past decade, is of considerable breadth and depth. Large resources have been expended and many avenues have been investigated in order to ensure that sound technical solutions are available, underpinned by good scientific understanding. Although the technology for geologic disposal is well developed, its further refinement, testing, demonstration, implementation and quality control under reference conditions are challenging tasks extending over decades. In particular, although the available methods for long-term performance assessment have been found adequate to evaluate the long-term impacts of a deep geological repository, there still are prospects, for specific improvements in the assessment of safety and in safety cases, as a whole. There is room, for example, for developing traceability and transparency, for better taking into account the interaction between site characterisation and PA, for developing further the treatment of variability and uncertainty, and for the development of a more profound general understanding. On the other hand, there is a need to structure national programmes and safety studies in a manner to emphasise confidence aspects. Stakeholder confidence, both technical and non technical, is a concern and a goal that needs to be developed further in order to arrive at decisions that are broadly supported and are robust both to technical and non-technical concerns.

[1] Geological Disposal of Radioactive Waste: review of Developments in The Last Decade, NEA, París, 1999 (in press).

[2] Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? - An International Assessment, NEA, París, 1999.

[3] Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes, NEA, París, 2001 (being finalised)

[4] Considering Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, NEA, París, 2001 (being finalised)

[5] Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies, NEA, París, 1997.

[6] Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories, NEA, París, 2000

[7] Approaches and Arguments to Establish and Communicate Confidence in Safety and the Overall Results of Integrated performance Assessments, NEA, París, 2001 (being finalised)

[8] Confidence in the Long-term Safety of Deep "Geological Repositories - Its Development and Communication, NEA, París, 1999.

[9] The Environmental and Ethical Basis of geological Disposal - A Collective Opinion, París, 1995.

[10] Strategic Areas In Radioactive Waste Management, NEA, París, 1999.

[11] Stakeholder Confidence and Radioactive Waste Disposal, Workshop Proceedings, NEA, París, 2000.



Claudio PESCATORE es responsable de los programas de gestión de residuos radiactivos de la División de Protección Radiológica y Gestión de Residuos Radiactivos de la AEN/OECD. Actualmente es jefe adjunto de la División y tiene una experiencia de más de 20 años en el campo de la gestión de los residuos radiactivos, habiendo trabajado anteriormente en el Laboratorio Nacional de Brookhaven y en la Universidad de Illinois de Urbana-Champaign, en el ámbito nacional (EE.UU. e Italia), y, en el internacional (AEN), en aspectos técnicos, estratégicos y políticos de la gestión. Estudió ciencias físicas y posteriormente realizó un doctorado en Ingeniería Nuclear.

Claudio PESCATORE he is responsible for the Radioactive Waste Management programmes in the Division of Radiation Protection and Radioactive Waste Management at the NEA/OECD. He is Deputy Head of the Division and has over 20 years experience in the field of RW management, with previous experience gained at Brookhaven National Laboratory and the University of Illinois at Urbana-Champaign. Active at national (USA, Italy) and international level (OECD/NEA) in technical, strategy, and policy areas dealing with radioactive waste, his background is in the physical science, with a doctorate in Nuclear Engineering.