

# Posibles sistemas para el almacenamiento del combustible agotado

por John P. Colton

El ciclo del combustible nuclear está integrado por varias operaciones distintas que se realizan antes y después de la irradiación del combustible en el reactor. Las operaciones que preceden a la inserción e irradiación de los elementos combustibles en un reactor suelen designarse como actividades de las *etapas iniciales* del ciclo del combustible, y las actividades que tienen lugar después de la irradiación se conocen como las *etapas finales* de dicho ciclo.

La extracción y tratamiento de minerales uranfíeros, el enriquecimiento del uranio y la fabricación de elementos combustibles a base de uranio son las etapas iniciales del ciclo del combustible nuclear. El almacenamiento y reelaboración del combustible agotado, la refabricación de combustibles a base de óxidos de uranio y plutonio, y la gestión de desechos son las etapas finales. Las etapas iniciales del ciclo del combustible se hallan bien desarrolladas y proporcionan combustible para diversos reactores de agua ligera, reactores de agua pesada y reactores refrigerados por gas. Las etapas finales del ciclo del combustible no hallan aún plenamente desarrolladas. Por diversas razones de tipo económico (el gran costo de las instalaciones), político (la necesidad de no proliferación) y técnico, los Estados que han adoptado la energía nucleoelectrica no han llegado aún a una decisión clara y unánime sobre lo que debe hacerse en último término con el combustible nuclear agotado.

Como ocurre con muchas decisiones así retrasadas, la acumulación de residuos se refleja en la necesidad de crear nuevos "almacenes". En el caso del ciclo del combustible nuclear, ese retraso ha ocasionado el almacenamiento de combustible agotado de los reactores. El combustible agotado se almacena actualmente bajo el agua en piscinas hasta que se disponga de instalaciones para reelaborar y reciclar el uranio y el plutonio o bien para almacenar permanentemente el combustible agotado. Si no se procede a reelaborar el combustible agotado, entonces la etapa final del ciclo del combustible será el almacenamiento permanente del mismo.

Los principales tipos de reactores que se estudiarán en este trabajo son la generación actual de reactores de agua ligera y también, aunque en forma somera, los reactores de agua pesada del tipo CANDU. El ciclo del combustible correspondiente a los reactores de agua ligera se había basado siempre en el supuesto de que el combustible agotado permanecería por breve tiempo en piscinas de almacenamiento situadas cerca del reactor, y que luego, transcurrido un tiempo adecuado (aproximadamente un año), dicho combustible se enviaría a una planta de reelaboración. El combustible agotado de los reactores de agua pesada del tipo CANDU estaba destinado originalmente a su almacenamiento permanente y no a la reelaboración. La tecnología, los aspectos económicos de la industria nuclear, el ciclo del combustible y la cuestión política que plantea la no proliferación serán los factores que determinen si se ponen en práctica o no estas políticas básicas.

De acuerdo con las estimaciones hechas en el Estudio de centros regionales para el ciclo del combustible nuclear, se espera que para 1985 la cantidad acumulada de combustibles ago-

---

El Sr. Colton es miembro de la Sección de Materiales Nucleares y Ciclo del Combustible, integrada en la División de Energía Nucleoelectrica y Reactores.

tados a base de óxidos pueda alcanzar las 26 000 toneladas. Aunque la cantidad acumulada en almacenamiento pudiera reducirse proporcionalmente con las reducciones de la proyectada capacidad de generación nucleoelectrónica, las necesidades en materia de almacenamiento no quedarían modificadas de manera significativa antes de 1985 por una decisión inmediata de construir nuevas plantas de elaboración, ya que pasaría necesariamente un período de ocho a diez años antes de que tales plantas entrasen en funcionamiento.

Recientemente, ciertas razones políticas y de protección del medio ambiente han puesto en tela de juicio la futura disponibilidad de plantas de elaboración y han concedido mayor interés a la revisión de los actuales programas de almacenamiento, teniendo en cuenta las tecnologías de que se dispone para el almacenamiento provisional del combustible.

### **Características del combustible nuclear**

La longitud total de un elemento combustible para reactores de agua ligera es de cuatro a seis metros, mientras que la longitud de un elemento combustible para reactores de agua pesada es de metro y medio. El peso de cada conjunto destinado a reactores de agua ligera es de 700 a 800 kg, para reactores de agua a presión; de 200 a 300 kg, para reactores de agua en ebullición, y de 25 kg aproximadamente, para reactores de agua pesada. El actual diseño de reactores de gran potencia prevé que los reactores de agua a presión soporten 33 000 megavatios térmicos diarios por tonelada métrica (MWd/t) a una potencia específica de 36 MW/t, que los reactores de agua en ebullición soporten 27 500 MWd/t a una potencia específica de 22 MW/t, y que los reactores de agua pesada soporten 7500 MWd/t con una potencia específica de 15,2 MW/t.

La desintegración radiactiva, con la emisión de partículas alfa y beta desde el núcleo y la descarga de energía en forma de rayos gamma, constituye la fuente de generación térmica de los conjuntos de combustible agotado. Como ejemplo, la generación térmica en el combustible agotado expuesto a 25 000 MWd/t de operación del reactor con una potencia específica de 35 MW/t, decrece de una potencia térmica de 100 kW/t en diez días de refrigeración a menos de 1 kW/t cuando el combustible se aproxima a los 100 días de refrigeración. Los gases de fisión retenidos dentro del tubo de la vaina constituyen un riesgo potencial, si algún orificio de la vaina permite que el gas se escape. La generación térmica, el gas potencial y la contaminación del agua, y las medidas de seguridad y de evitación de la criticidad son las consideraciones primordiales relativas al diseño que hay que aplicar en la proyección y construcción de cualquier tipo de plantas de almacenamiento.

### **Métodos actuales para el almacenamiento de combustible para reactores de agua ligera**

Se emplean piscinas llenas de agua tanto para el almacenamiento a corto plazo como para el almacenamiento prolongado de combustible agotado; dichas piscinas se consideran fundamentalmente como métodos plenamente desarrollados desde el punto de vista tecnológico. El almacenamiento en agua se ha escogido por la razón primordial de que este método es conveniente y eficaz. El agua es un buen blindaje radiactivo y un buen refrigerante, es fácil de conseguir y barata, puede tratarse con facilidad, y proporciona un medio transparente que permite el control visual en el tratamiento del combustible.

La mayoría de las piscinas de agua para el almacenamiento del combustible tienen el mismo diseño: rectangular en sección horizontal, y de 12 a 13 metros de profundidad. Los conjuntos combustibles que van a almacenarse se colocan en bastidores en el fondo de la piscina. Estos bastidores ofrecen apoyo y protección contra la criticidad accidental. Los conjuntos se depositan y retiran verticalmente, desde lo alto de los bastidores, mediante

sistemas de manipulación mecánica diseñados para ofrecer seguridad. Los elementos combustibles deben permanecer sumergidos unos tres metros durante las operaciones de manipulación del combustible, a fin de que el operador quede protegido radiológicamente. Las piscinas para reactores de agua en ebullición se llenan con agua desmineralizada, mientras que las piscinas para reactores de agua a presión se llenan con agua boratada. La razón de esta diferencia es que los reactores de agua a presión emplean para el control de la reactividad, agua boratada en el sistema primario, la cual se mezcla con el agua de la piscina durante la operación de recarga. Los reactores de agua en ebullición emplean como refrigerante agua desmineralizada. Las piscinas están construidas de hormigón armado y tienen el grosor suficiente para cumplir los requisitos de blindaje y estructura. Las piscinas están diseñadas para garantizar la estanqueidad. Las actuales piscinas de los reactores tienen de 10 a 20 metros de longitud y de 7 a 15 metros de anchura. Las dimensiones de la zona de almacenamiento son función de la cantidad de combustible que deba almacenarse, la cual depende a su vez del tipo y potencia del reactor de que se trate.

Los principios de diseño se basaban inicialmente en el supuesto de que el combustible agotado sería enviado a una planta de reelaboración al cabo de un año a contar desde el momento en que era descargado del reactor. Por eso, se ha previsto normalmente espacio suficiente para la descarga de un núcleo completo del reactor y, además, para una o dos recargas anuales (una recarga tiene, aproximadamente, la tercera parte del volumen del núcleo del reactor). Análogamente, las piscinas de almacenamiento en las plantas de reelaboración de combustible han sido diseñadas partiendo del supuesto de que el combustible agotado sería reelaborado poco después de su recepción. El espacio previsto era suficiente para el almacenamiento de combustible equivalente al caudal de materiales de una planta de reelaboración en un período de tres a cuatro meses.

Debido a los retardos en la reelaboración, el espacio previsto inicialmente para el almacenamiento correspondiente a los reactores de primera hora, ha resultado inadecuado, por lo que se buscan otras soluciones para ampliar la capacidad de almacenamiento, ya sea modificando las instalaciones de que se dispone actualmente o bien creando otras nuevas. Estas soluciones son:

1. La densificación de almacenamiento (compacción): Las piscinas de almacenamiento actuales tendrán mayor capacidad si se reduce el espacio entre los conjuntos de combustible mediante el empleo de sustancias que absorban neutrones.
2. Ampliación del volumen de las piscinas: mediante esta posibilidad se aumenta la capacidad ampliando las dimensiones físicas de las actuales piscinas.
3. Instalaciones adicionales para el almacenamiento húmedo: En esta posibilidad se prevé establecer un lugar de almacenamiento complementario en el emplazamiento del reactor o en otro sitio.

Estas consideraciones se refieren únicamente a la ampliación inmediata de la capacidad. Para el almacenamiento del combustible en forma recuperable, durante un período más prolongado o indefinido será necesario estudiar nuevos principios de diseño.

La Figura 1 muestra lo que podría considerarse un ciclo normal del combustible, con varias opciones, incluida la evacuación geológica permanente.

### **Almacenamiento a largo plazo en piscinas del combustible para reactores de agua ligera**

El almacenamiento de elementos combustibles agotados en piscinas de agua parece técnicamente viable durante períodos largos. Se prevé que los problemas operacionales del almacenamiento serán análogos a los del almacenamiento a corto plazo. Los nuevos problemas

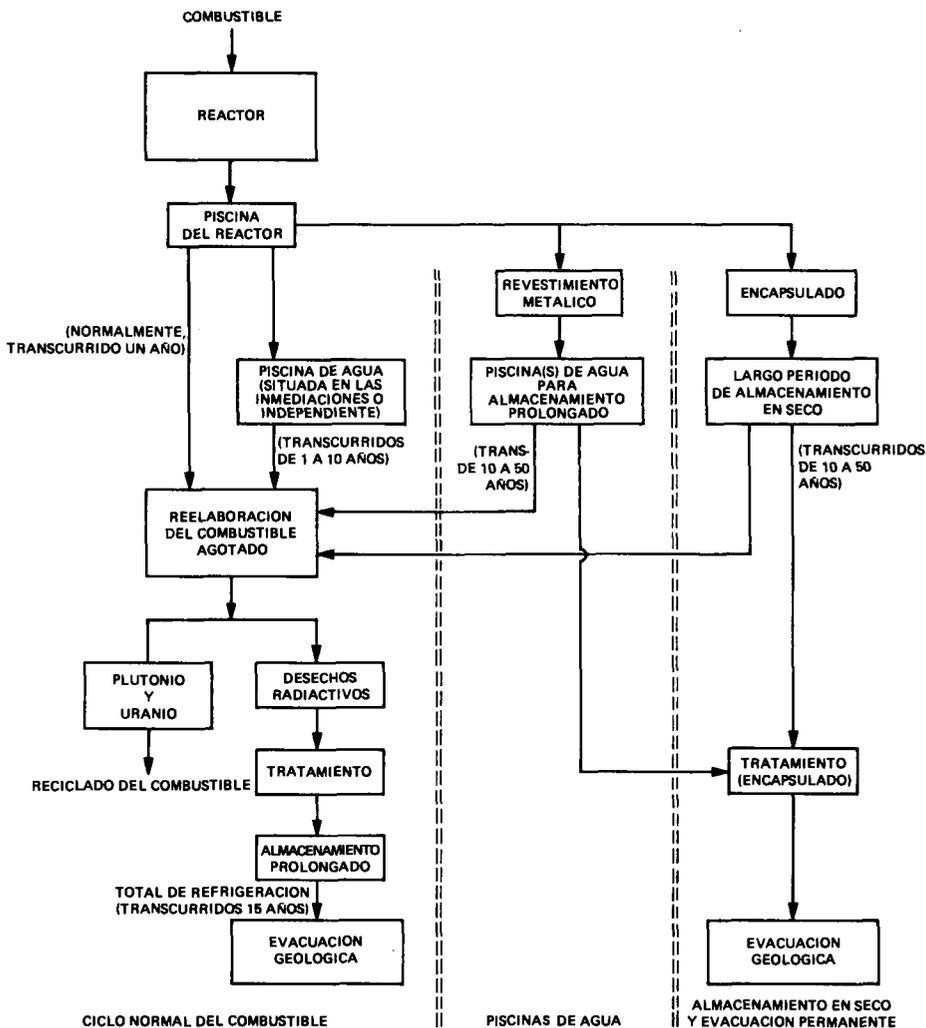
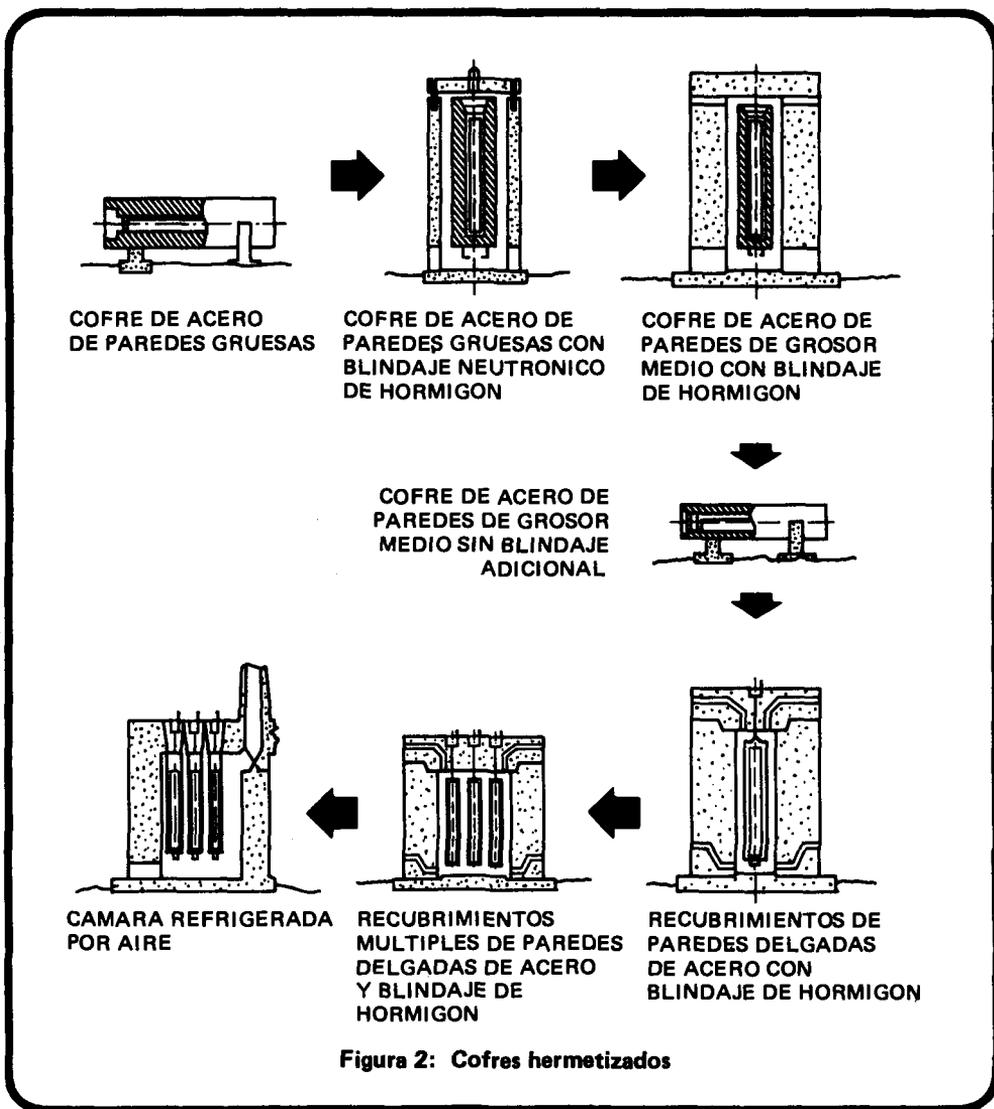


Figura 1: Posibles opciones de gestión del combustible agotado

que, al preverse el almacenamiento de elementos combustibles durante varias décadas, tal vez podrían surgir son las mayores o más graves fugas de combustible, la corrosión acelerada, la estabilidad térmica y la estabilidad radiactiva. En el caso de que surjan algunos de ellos, se confía en que se presenten de manera paulatina y con la lentitud suficiente para que haya tiempo de hacer frente a esos problemas, por ejemplo, recurriendo a la encapsulación o al revestimiento metálico. Sería necesario preparar medidas para tomar muestras para ensayos de corrosión tanto de los materiales de los elementos combustibles como del equipo relacionado con las piscinas de almacenamiento que deban vigilarse.

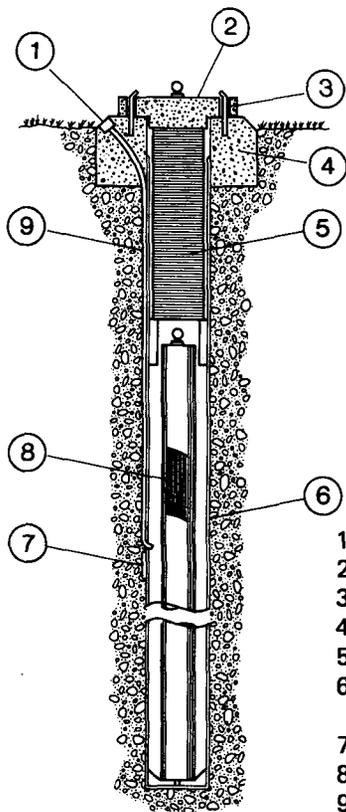


### Posibles tecnologías de almacenamiento para reactores de agua ligera

Varios Estados Miembros están evaluando actualmente tres técnicas básicas.

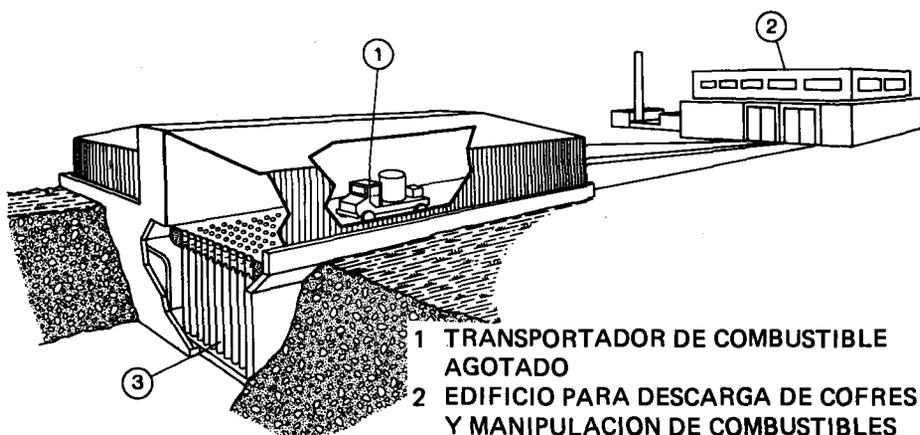
- Cofre hermetizado: una cámara a poca profundidad, con uno o varios conjuntos hermetizados con respecto al aire por medio de un blindaje individual;
- Cajón enterrable: uno o varios conjuntos hermetizados con respecto al aire y enterrados a poca profundidad para que el suelo sirva de blindaje;
- Cámara refrigerada por aire: colección de varios conjuntos dentro de una gran zona blindada (edificio) y refrigerada directamente por aire.

Las Figuras 2, 3, y 4 ilustran las tres técnicas básicas a que nos hemos referido. Estos procedimientos para la refrigeración por aire del combustible agotado parecen exigir que los



- 1 CAJA DE CONEXIONES DEL MONITOR
- 2 TAPA DE RECUBRIMIENTO DE HORMIGON
- 3 PERNOS DE SUJECION
- 4 CORONA DE HORMIGON
- 5 BLINDAJE DE ALTA DENSIDAD
- 6 TUBO ESTANDAR DE CAJON O TUBO CORRUGADO
- 7 MONITOR DE TEMPERATURA EXTERIOR
- 8 CONJUNTO COMBUSTIBLE
- 9 MONITOR DE TEMPERATURA INTERIOR

Figura 3: Cajón enterrable.



- 1 TRANSPORTADOR DE COMBUSTIBLE AGOTADO
- 2 EDIFICIO PARA DESCARGA DE COFRES Y MANIPULACION DE COMBUSTIBLES AGOTADOS
- 3 CONTENEDORES DE RECUBRIMIENTO PARA CONJUNTOS COMBUSTIBLES

Figura 4: Cámara refrigerada por aire.

elementos combustibles sean enfriados durante cinco años como mínimo en piscinas de agua (se prefieren tiempos más prolongados de refrigeración, los cuales se aplicarán en la mayoría de los programas). De ordinario, el combustible será encapsulado antes de su almacenamiento en aire, procurando que haya medios de transmisión térmica en los espacios que quedan entre las agujas de combustible, a fin de que exista una mejor conducción del calor y se enfríen subsiguientemente los elementos. Si se prevé el almacenamiento en seco como etapa provisional para el almacenamiento de combustible antes de su reelaboración, entonces los materiales para la encapsulación y los filtros han de ser compatibles con las fases de troceado y disolución en la planta de reelaboración.

Actualmente se emplean cámaras refrigeradas por aire para combustibles de reactores de gas a alta temperatura, moderados por grafito, las cuales han servido como demostración de las tecnologías de construcción, manipulación del combustible y eliminación de calor. Los franceses han empleado una cámara refrigerada por aire (PIVER) para desechos de alta actividad, con circulación forzada y filtros de alto rendimiento. Parecería posible adaptar estas tecnologías al almacenamiento de combustibles para reactores de agua ligera. Las tecnologías a base de cofres hermetizados se han ensayado en el Canadá con calentamiento eléctrico y con reactores de agua pesada CANDU. En los Estados Unidos se ha ensayado la misma tecnología, empleando calentamiento eléctrico, para desechos solidificados de alta actividad. En cada uno de estos casos se realizó una prudente aplicación de diversas técnicas (transmisión térmica, blindaje, etc.). La tercera tecnología, consistente en emplear un cajón enterrable, se ha empleado en varios países para el almacenamiento de combustible de reactores experimentales.

#### **Opción para el almacenamiento y evacuación de combustible agotado de reactores de agua pesada**

La principal diferencia entre el combustible del reactor de agua pesada y el combustible del reactor de agua ligera es que aquél es más corto (0,5 m) y tiene un grado de quemado más bajo (7600 MWd/t). Dado que el combustible es uranio natural, no se presentan problemas de criticidad para el almacenamiento que emplee agua ligera como refrigerante.

El almacenamiento normal de combustibles de reactores de agua pesada en emplazamientos de reactores de tipo CANDU se realiza en piscinas de agua. Las opciones para el almacenamiento provisional de combustibles para reactores de agua pesada son análogas a las alternativas que se ofrecen para el combustible agotado de reactores de agua ligera. Se están estudiando las tecnologías para el almacenamiento en agua tanto en el emplazamiento del reactor como fuera de él, como asimismo las tecnologías para el almacenamiento en seco. Las posibilidades de almacenamiento en seco comprenden las cámaras de convección de aire, las cámaras de conducción de aire, los recipientes de hormigón y los estratos salinos subterráneos. Se estima de que el empleo de piscinas para el almacenamiento en agua es una tecnología ya probada. El almacenamiento en seco en cámaras se considera como una tecnología posible para reactores de agua pesada, pero de efectividad aún demostrada. El almacenamiento en seco en recipientes de hormigón es una opción posible y está siendo investigada en un programa actualmente en desarrollo en el Canadá.

#### **Resumen**

Se ha ganado considerable experiencia en el dominio del almacenamiento de combustible agotado en piscinas de agua. Ahora bien, este almacenamiento ha venido realizándose a corto plazo, y no se posee aún suficiente experiencia sobre las características necesarias para el revestimiento metálico y la encapsulación de combustibles agotados para su almacenamiento

a largo plazo debajo del agua. No obstante, con muy poco trabajo adicional de desarrollo, el almacenamiento de combustibles agotados en piscinas de agua puede considerarse como una opción adecuada para el almacenamiento provisional.

Actualmente se están desarrollando algunas técnicas de enterramiento a poca profundidad y de almacenamiento en seco con miras a un almacenamiento a largo plazo. Esos métodos comprenden las cámaras de convección de aire, las cámaras de conducción de aire, el empleo de recipientes de hormigón y el empleo de cajones enterrables. Las técnicas de almacenamiento en seco se consideran opciones potenciales, aunque deben ser objeto de demostración práctica antes de decidir su utilización.

Se está estudiando el almacenamiento en seco, en forma recuperable, a grandes profundidades en senos rocosos. Este método se desarrollaría en forma análoga a los procedimientos empleados para el almacenamiento a largo plazo de desechos solidificados de alta actividad. Cuando se haya obtenido suficiente experiencia, la instalación podría convertirse eventualmente en lugar permanente de evacuación geológica, tras rellenado y hermetización. Es probable que, en un futuro próximo, comience a trabajarse en un nuevo desarrollo y demostración de esta tecnología. De manera análoga, se está desarrollando la tecnología del almacenamiento en seco en minas de sal.

En el mundo de la energía nuclear no está aún claro qué métodos se van a emplear en último término con el combustible nuclear agotado (reelaboración o tratamiento de desechos). Algunos Estados Miembros han decidido seguir el camino de la reelaboración, mientras que otros prefieren retrasar la decisión final hasta que puedan hacerse nuevas evaluaciones. Todas las proyecciones señalan que será necesario disponer de nueva capacidad de almacenamiento a corto plazo y a plazo intermedio. El breve estudio que aquí presentamos muestra que existen varias posibilidades de solución para este problema. Conviene hacer notar que el almacenamiento en forma provisional no es la solución: será necesario adoptar una decisión final eligiendo entre reelaborar el combustible agotado o almacenarlo de forma permanente e irrecuperable.