

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE IRRADIADO

**Aurora MARTINEZ-ESPARZA VALIENTE
y Eduardo RAMIREZ ONTALBA**

INTRODUCCION

El combustible nuclear, a medida que genera energía en el reactor, pierde efectividad a causa de la acumulación de productos de fisión y a la disminución en contenido de material fisionable. Por ello es necesario sustituir parte del mismo en la operación de recarga anual. Este combustible se almacena en las piscinas que, para tal efecto, disponen los reactores nucleares. El almacenamiento se efectuaba durante un período corto y se trasladaba a una planta de reprocesado.

En los últimos años ha aparecido la necesidad de almacenar el combustible durante períodos largos de tiempo. La primera solución adoptada ha sido incrementar la capacidad de almacenamiento en las piscinas de los reactores, utilizando la técnica de compactación de bastidores. Además se hacen necesarias, en algunos países, instalaciones adicionales de almacenamiento que proporcionen la flexibilidad adecuada, hasta que se decida la solución definitiva a adoptar entre el ciclo cerrado, abierto o mixto.

El combustible irradiado, una vez retirado de las piscinas del reactor, puede almacenarse en el propio emplazamiento de la central o trasladarse a un emplazamiento independiente. La decisión va ligada al coste de ambas alternativas y al modelo de gestión global del combustible irradiado.

Las distintas técnicas de almacenamiento, bajo agua o en seco, que se describen a continuación son aplicables a ambos casos, aunque en alguna de las técnicas la economía de escala juega un papel fundamental.

Una vez concluida la descripción de las distintas técnicas de almacenamiento se da una estimación comparativa de las mismas desde el punto de vista técnico, económico y de facilidad previsible de autorización administrativa en USA.

DESCRIPCION DEL ALMACENAMIENTO BAJO AGUA (PISCINAS)

Consiste en el almacenamiento de combustible irradiado, bajo agua que actúa como medio refrigerante y de blindaje, en piscinas de hormigón. Los elementos combustibles se alojan en bastidores metálicos, que se construyen con la adecuada separación, geometría y materiales, para que en toda condición mantengan el combustible subcrítico. Los muros y el suelo de las piscinas

son de hormigón armado revestidos con acero inoxidable.

El nivel del agua se mantiene a una altura suficiente para proporcionar un blindaje adecuado en toda condición. Las piscinas están equipadas con sistemas de tratamiento de agua, refrigeración, ventilación y aire acondicionado.

El almacenamiento en piscinas es la técnica más experimentada en la actualidad, porque tanto en los reactores como en las plantas de reprocesado son imprescindibles, aunque su capacidad es reducida.

PISCINAS EN EL EMPLAZAMIENTO DE LA CENTRAL

La construcción de nuevas piscinas para el almacenamiento adicional de combustible irradiado en las instalaciones propias de la central parece en principio poco aconsejable comparada con otras técnicas de almacenamiento.

PISCINAS FUERA DEL EMPLAZAMIENTO DE LA CENTRAL

Las piscinas de almacenamiento fuera de los emplazamientos de las centrales nucleares se pueden realizar en dos modalidades: construcción de instalaciones independientes a cualquier otra instalación nuclear o aprovechamiento de instalaciones nucleares que disponen de piscinas, incrementando su capacidad.

PISCINAS INDEPENDIENTES

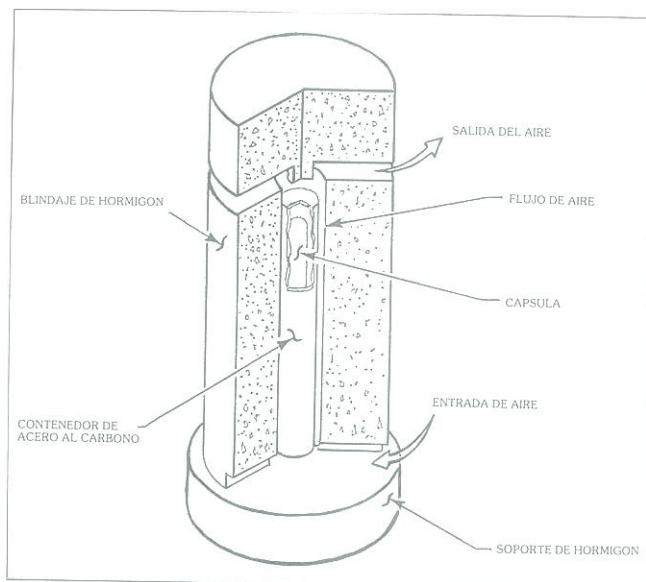
El proyecto más avanzado y prácticamente único de instalación independiente es el sueco, que fue autorizado en 1980. Consiste en una instalación subterránea, exceptuando la zona de recepción del combustible, con una capacidad de 3.000 t U. Su entrada en servicio está prevista en 1985.

PISCINAS DEPENDIENTES

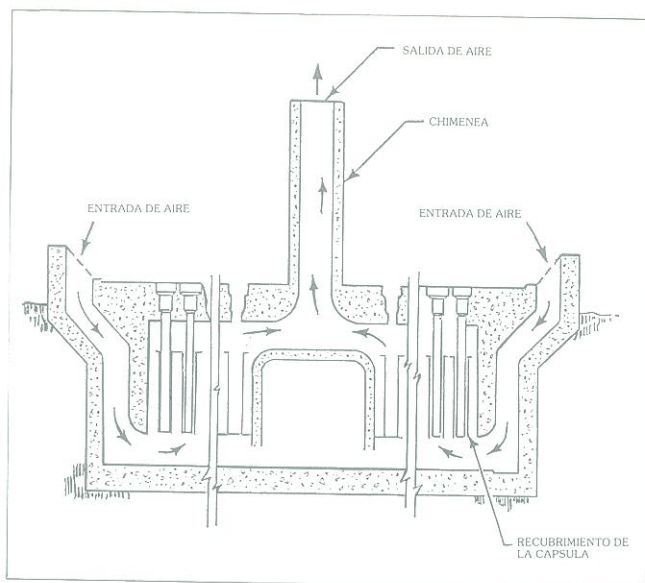
Se basan en aprovechar piscinas pertenecientes a plantas de reprocesado que en la actualidad no funcionan (USA) o de reactores de investigación (Italia). En la tabla 1 se recogen las previsiones de aumento de capacidad en las plantas USA.

Eduardo RAMIREZ ONTALBA es Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid (1973). Ingresó en ENUSA en septiembre de 1976. Trabaja en la División de Combustible Irradiado desde su creación en 1978.

Aurora MARTINEZ-ESPARZA es Licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad de Madrid (1973). Comenzó a trabajar en ENUSA en septiembre de 1974, incorporándose a la División de Combustible Irradiado tras su creación en 1978.



F I Almacenamiento en contenedores de hormigón.



F II Almacenamiento en cámaras.

TI

FABRICAS DE REPROCESADO POTENCIALMENTE UTILIZABLES COMO AFR EN USA

Localización	Propietario	Capacidad piscinas inicial (t U)	Posible capacidad AFR (t U)
West Valley, N. Y.	Nuclear Fuel Serv.	250	1.400
Morris, F. L.	G. E.	750	1.850
Barnwell, S. C.	Allied General Nuclear Serv.	400	1.750

Las plantas de reprocesado para combustible LWR en funcionamiento propiedad de COGEMA y BNFL no se han considerado, pues sus piscinas se utilizan para la recepción del combustible, aunque COGEMA ha incrementado la capacidad de almacenamiento con la construcción de nuevas piscinas en La Hague de 2.000 t U de capacidad, expandible a 4.000 t U, para almacenar el combustible irradiado contratado.

do; consiste en un cilindro hueco de hormigón armado, situado en una plataforma, en posición vertical; en la parte superior tiene una tapa por donde se introducen los elementos combustibles, encapsulados en acero inoxidable y en atmósfera de helio. La tapa puede sellarse para dotar al contenedor de la estanqueidad requerida. El contenedor puede tener unos orificios en su parte inferior y superior para la circulación de

aire (fig. 1), o puede ser cerrado, siendo la refrigeración únicamente exterior. Contenedores de este tipo están siendo ensayados en las instalaciones de E-MAD de Nevada, USA, con un elemento combustible tipo PWR, con 1 Kw de potencia térmica a disipar. Se ha demostrado que el nivel de temperatura de la vaina (149° C) y el nivel de dosis en la superficie del contenedor (1,3 mrem/h) son aceptables.

ALMACENAMIENTO EN CAMARAS

Uno de los primeros conceptos de almacenamiento en seco, desarrollado en Canadá y USA, fue el llamado en cámaras (vaults). En este sistema, los combustibles se introducen en un recipiente ligero y estanco (cápsula) cuya función esencial es asegurar una barrera contra el escape de productos radiactivos. Los combustibles, una vez encapsulados, se almacenan en la cámara sobre

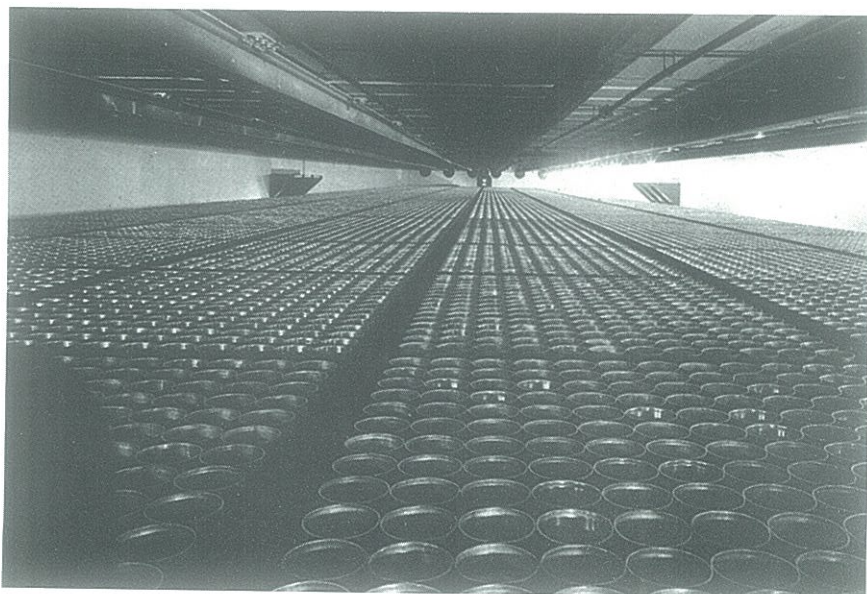
DESCRIPCION DE TECNICAS SECAS

Los sistemas de almacenamiento conocidos como secos utilizan como medio refrigerante primario de los combustibles un gas, que puede ser aire o un gas inerte. Se requiere siempre un período de almacenamiento en las piscinas de los reactores para que disminuya suficientemente la potencia térmica a disipar. Todas las técnicas, excepto contenedores y alguno de los tipos de almacenamiento en cámaras, tienen en común la necesidad de encapsular el combustible.

CONTENEDORES DE HORMIGON (SILOS)

No se han utilizado para almacenar combustible LWR, sin embargo su desarrollo tecnológico no sería complica-

F III Interior del almacenamiento Wylfa.



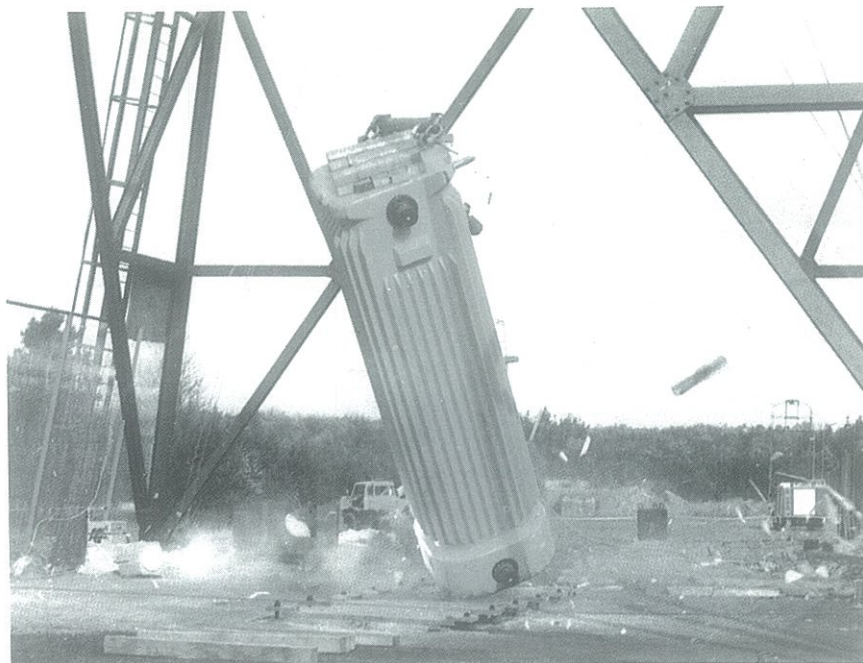
una estructura soporte. La cámara se construye de hormigón armado y puede estar parcialmente enterrada. Las cámaras pueden tener refrigeración por convección natural o por circulación forzada (fig. 2). Al igual que el almacenamiento en piscinas, es una solución poco flexible, ya que no permite incrementos de capacidad pequeños.

Aunque la inversión inicial de almacenamiento en cámaras es alta, pues requiere desde el principio una instalación con celda caliente y estación de encapsulado, sin embargo, dado su carácter pasivo, si la refrigeración es por convección natural y los costes de operación reducidos, puede resultar interesante, tanto para el almacenamiento de combustible como de residuos radiactivos de alta actividad vitrificados.

Se tiene experiencia en construcción y operación en las plantas estadounidenses de Peach Bottom y Fort St. Vrain para combustible HTGR con el modelo de circulación forzada. Otras instalaciones de este tipo están funcionando en Wylfa (Inglaterra) para combustibles de reactores tipo grafito gas (Mgnox), y en Marcoule (Francia) para el almacenamiento de residuos de alta actividad.

La instalación de Wylfa construida por General Electric Co. Reactor Equipment, Ltd. (GEC REL), diseñada y acoplada físicamente a la central nuclear (fig. 3), tiene una capacidad para almacenar 350 t U. GEC REL está desarrollando esta tecnología para combustible de agua ligera.

En Suiza, Electrowatt Engineering Services, Ltd., ha desarrollado un concepto que consiste en cámaras modulares de hormigón en las que se insertan los elementos combustibles previamente encapsulados en la propia central. Este



FV Contenedor CASTOR

diseño, llamado Modrex (Modular Dry Expandable Storage), incluye en cada módulo nueve silos; cada silo tiene una capacidad para 7 elementos PWR o 17 BWR.

ALMACENAMIENTO EN POZOS

Consiste en introducir el combustible encapsulado en un hueco excavado en el suelo (fig. 4). El pozo se cubre con una tapa blindada; la disipación del calor se hace por conducción a través del suelo y de la tapa. La distancia entre pozos es función del calor a disipar, la naturaleza del terreno, el blindaje y la criticidad.

Los pozos se pueden equipar con monitores de calor y radiación. Los elementos combustibles se introducen en el pozo encapsulados, en acero.

Permite incrementos de capacidad pequeños (uno ó dos elementos por módulo) en función de las necesidades, pero debido a que requiere una instalación de encapsulado del combustible y un equipo blindado de transferencia hasta la posición de almacenamiento, implica una gran inversión inicial.

ALMACENAMIENTO EN CONTENEDORES

El almacenamiento en contenedores tiene origen en el concepto canadiense de almacenar el combustible irradiado tipo CANDU en contenedores de hormigón, concebidos sólo para la función de almacenamiento.

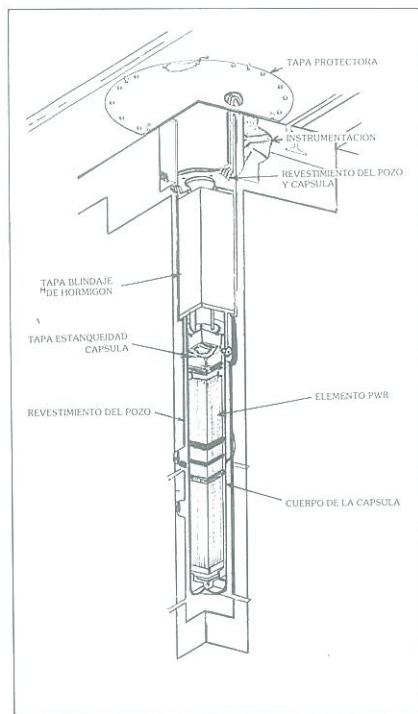
En los últimos años se ha desarrollado la idea de optimizar los contenedores

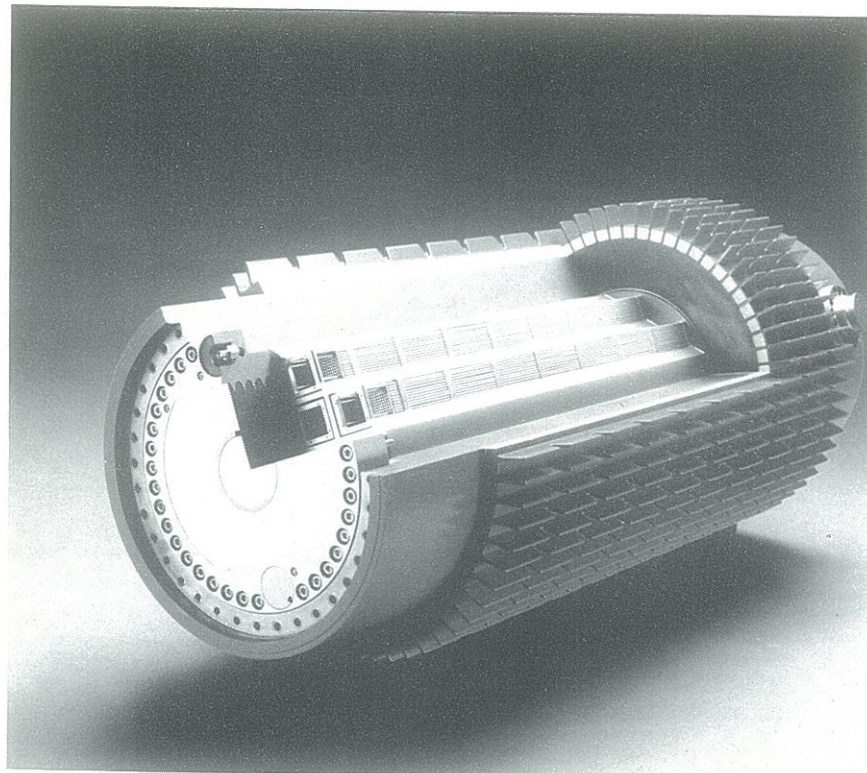
tanto para la función transporte como para la de almacenamiento temporal de combustible LWR. Uno de los parámetros que más influye en el coste de fabricación del contenedor es el tiempo de enfriamiento del combustible, previo a la carga del contenedor. Los contenedores de transporte actualmente en el mercado están diseñados para un enfriamiento del combustible de 120 días, lo que supone una potencia térmica de unos 15-20 Kw/t U, que ha de disiparse a través del cuerpo del contenedor y de numerosas aletas exteriores a éste. Tiempos de enfriamiento más largos (1,5 a 6 años) permiten simplificar extraordinariamente las aletas y reducir su número.

Además, empleando nuevos materiales y métodos de fabricación, así como optimizando el diseño, se ha logrado reducir considerablemente el coste de los contenedores, con vistas a su utilización para el transporte y almacenamiento.

En la República Federal Alemana, DWK, la empresa encargada de la parte final del ciclo del combustible, ha patrocinado el desarrollo de dos diseños de contenedores de transporte y almacenamiento con las empresas General Nuclear Services (GNS) y Transnuclear; ambos diseños, CASTOR y TN-1300 (figs. 5 y 6), están probados para funciones de transporte por las autorizaciones de seguridad nuclear. Se han solicitado dos autorizaciones para instalaciones de almacenamiento en las centrales nucleares de Würgassen y Stead. La instalación independiente de almacenamiento de Goerleben, que se encuentra en fase de construcción, se pondrá en marcha a finales de 1983.

FIV Almacenamiento en pozos





F VI Contenedor TN. 1.300.

Los contenedores desarrollados en Alemania, en ambos casos, son de fundición nodular y cumplen con las condiciones de seguridad para contenedores de transporte tipo B (U), clase Fisil II, del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

En los Estados Unidos se han llevado a cabo desde 1978 programas para el desarrollo de contenedores, tanto de transporte y almacenamiento como de almacenamiento únicamente.

La empresa americana Ridihalgh Eggers and Associates (REA) en colaboración con Broks and Perkins ha diseñado un contenedor capaz de almacenar 24 elementos.

Otras empresas que en EE.UU. están desarrollando contenedores de almacenamiento y transporte son Nuclear Assurance Corporation (NAC), que está desarrollando un contenedor para 24 elementos PWR, y Combustion Engineering que desarrolla otro con la misma capacidad. La US NRC está estudiando

una autorización genérica de tres tipos de contenedores (REA, CASTOR y Combustion) para el almacenamiento de combustible irradiado.

En España, ENUSA, la JEN y ENSA han acometido el desarrollo de un contenedor de fundición nodular para transporte y almacenamiento con capacidad para 17 elementos PWR.

En la tabla II se recogen algunas de las características principales de los contenedores de almacenamiento y transporte que se encuentran en desarrollo en los distintos países.

Los contenedores se pueden alojar en un edificio ligero (fig. 7), que debe asegurar la necesaria convección de aire, pero que no tienen ninguna función de seguridad ya que todo el sistema de seguridad radica en el propio contenedor.

En una instalación de este tipo no se producen prácticamente residuos, y el impacto ambiental es mínimo. Dado que el edificio no tiene ninguna función de seguridad, el emplazamiento no re-

quiere características especiales, siendo válido en principio cualquier terreno, aunque es aconsejable que tenga una buena red de comunicaciones, en particular por ferrocarril.

El uso de contenedores de almacenamiento, que pueden estar o no homologados para el transporte, es una solución al problema de almacenamiento de combustible irradiado que permite pequeños incrementos de capacidad a medida que son necesarios, análogamente a los métodos de silos y pozos. El contenedor ofrece además la ventaja adicional, sobre éstos, de posibilitar el transporte de combustible irradiado.

COMPACTACION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Es una opción que puede usarse con cualquiera de los métodos de almacenamiento anteriormente descritos.

Consiste en el desmantelamiento del combustible irradiado, separando sus partes estructurales y encapsulando las varillas para su almacenamiento por separado. Se consigue una disminución de superficie del 38 al 44 % para los diversos elementos LWR. La disminución de volumen es aún mayor.

Aplicando esta opción a cualquiera de los métodos de almacenamiento se consigue un aumento sustancial en la eficiencia volumétrica y en la utilización de las instalaciones de almacenamiento con respecto a la de elementos sin compactar.

Esta compactación de elementos combustibles puede realizarse en piscinas o en celdas calientes. Tanto en su aplicación a piscinas como al almacenamiento en seco presenta algunas limitaciones, entre las que se encuentran:

a) Máxima temperatura de la vaina durante el almacenamiento en seco.

b) El desmantelamiento del combustible irradiado en la piscina del reactor y la contención necesaria en caso de una posible pérdida de integridad del combustible durante esta operación.

c) El método de evacuación de las partes estructurales resultantes de la actividad de desmantelamiento del elemento combustible.

T II

CONTENEDORES DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

FABRICANTE	ENUSA/JEN/ENSA	REA (USA)	TRANSNUCLEAR (RFA)			GNS (RFA)					
Modelo	CENTAURO	REA 2033	TN-1300	TN-2100	CASTOR:	1A	1B	2A	2B	2C	V
Tipo	Almac. y transp.	Almac. sólo	Almac. y transp.					Almac. y transp.			
Capac. en núm. elem.											
PWR	17	24	12	21		4	—	9	9	—	20-24
Capac. en núm. elem.											
BWR	—	52	33	37		—	16	—	—	25	50-52
Peso cargado en t	100-115	82-97	117	110-120		60	80	100	80	100	100-115
Años de enfriamiento del Comb. Irradiado	5-6	5	1,5	5-8	1	1	1	1	1	5	
Potencia térmica a disipar Kw	17	24	50	15		25	32	50	40	50	45-55

ESTIMACION COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES METODOS DE ALMACENAMIENTO EN SECO DE COMBUSTIBLE

A continuación se dan los resultados de un estudio comparativo de los distintos métodos de almacenamiento en seco desde el punto de vista técnico-económico y de facilidad de autorización administrativa en USA.

Este estudio se realizó por E. R. Johnson Associates, Inc. (JAI), bajo contrato con el DOE (AC09-80ET 47929), como parte del programa de evaluación de métodos para el almacenamiento en seco del combustible irradiado.

Los factores tecnológicos que se tuvieron en cuenta fueron:

- Estado de la tecnología.
- Estado de desarrollo y demostración de equipo.
- Experiencia previa con este método.
- Complejidad de la operación.
- Garantía de calidad.
- Recuperabilidad del combustible.
- Consideraciones de seguridad y salvaguardias.

Los factores tenidos en cuenta en la estimación de la facilidad de autorización administrativa fueron:

- Barreras contra escape de radionúclidos.
- Sistemas de transferencias de calor pasivos frente a activos.
- Blindaje contra radiaciones.
- Factores que afectan la integridad de las barreras y el blindaje durante el período de almacenamiento (sísmicos, corrosión, etc.).
- Exposición del personal a la radiación.

En cuanto a la estimación económica, los costes de capital y operación se estimaron y compararon en base a:

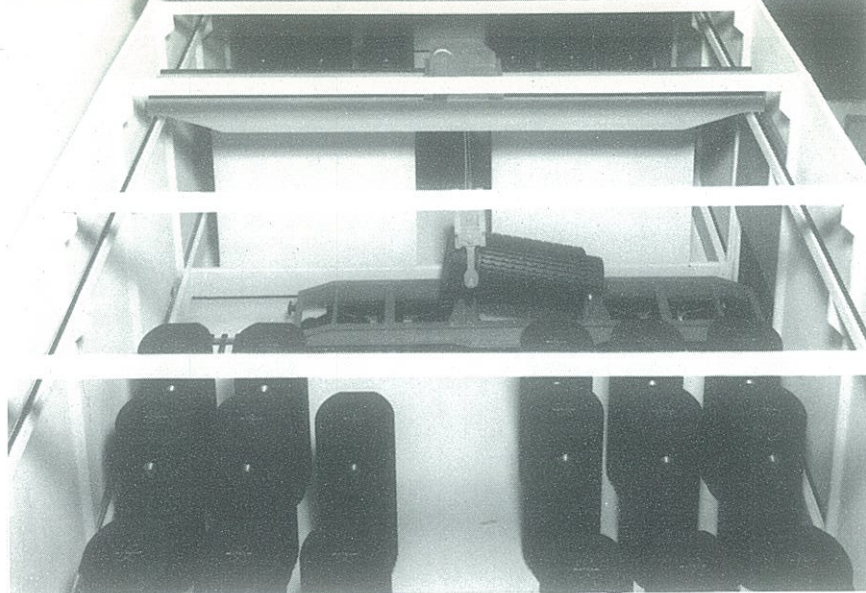
- Costes de capital.
- Costes de operación.
- Coste unitario de operación.
- Capacidad de la instalación 1000 t U.

En la tabla III se dan los resultados comparativos en función de números. Los números menores indican los métodos óptimos. Los números mayores indican las opciones menos favorables.

De esta tabla se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. Basados en los conocimientos actuales, la ventaja económica de la compactación del combustible no parece suficiente para asumir el riesgo técnico y de incertidumbre de autorización que existen actualmente.

2. El almacenamiento en cámaras (o en piscinas) requiere una gran inversión inicial en instalaciones que producen costes unitarios medios muy altos para el almacenamiento de combustible (300-500 \$/kg U).



F VII Maqueta instalación de almacenamiento en contenedores.

3. El almacenamiento de combustible por métodos modulares (tales como contenedores, pozos y silos) tiene los menores costes unitarios de almacenamiento; además, el riesgo de instalar una capacidad mayor de la que se necesita queda eliminado.

4. El almacenamiento de combustible irradiado en pozos y contenedores parece ser en la actualidad el mejor.

5. Una mayor investigación, desarrollo y demostración disminuirá los costes de almacenamiento por métodos modulares. Sin embargo, parece difícil que estos costes disminuyan por debajo de los 100 \$/kg.

BIBLIOGRAFIA

E. R. Johnson Associates DOE (AC09-80ET 47929).

Baldomero López Pérez: «Gestión del combustible irradiado». *Energía Nuclear*. Tomo 24, número 127, sep.-oct. 1980.

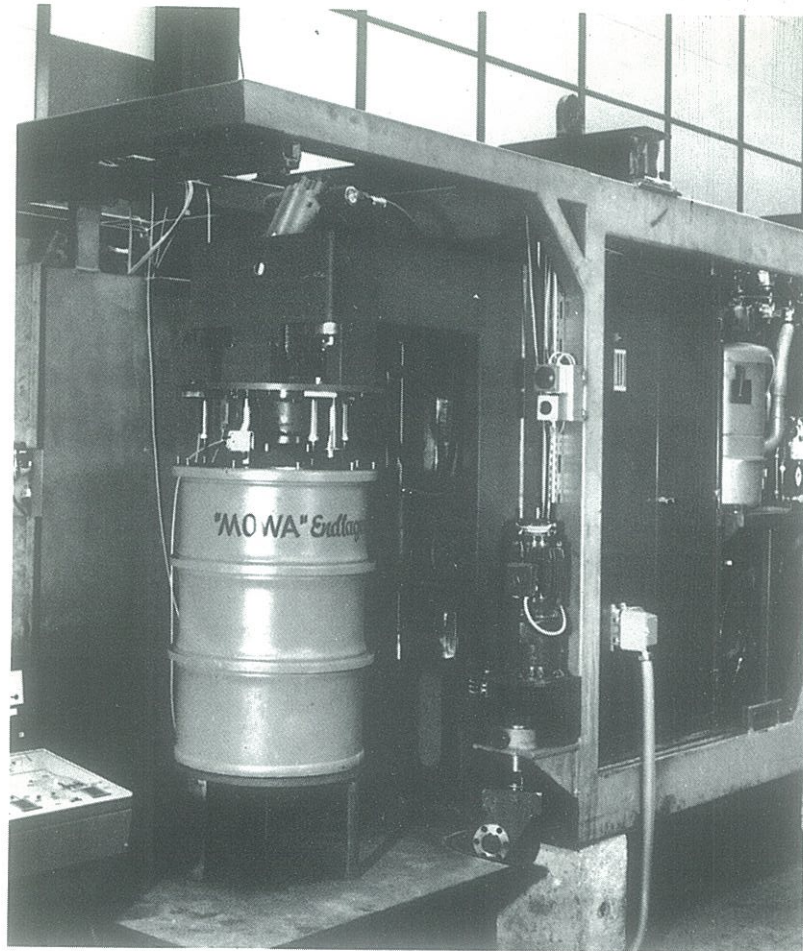
Aurora Martínez-Esparza Valiente: «Algunos aspectos del almacenamiento en seco del combustible irradiado: contenedor de transporte/almacenamiento. Consideraciones sobre la parte final del ciclo de combustible nuclear». Sigüenza, 27-28 junio 1980.

Tabla III
ESTIMACION COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES METODOS DE ALMACENAMIENTO EN SECO DE COMBUSTIBLE IRRADIADO (1)

	Tecnología	Facilidad autorización	Estimación Orden	Costes (\$/kg) (1981) Coste unitario
COMBUSTIBLE NO COMPACTADO				
Piscinas	4	1	13	311
Contenedores	3	3	3	117
Pozos				
Encapsulado en el reactor	1	2	5	137
Encapsulado en una instalación	2	2	10	257
Silos				
Encapsulado en el reactor	5	4	6	160
Encapsulado en nueva instalación	7	4	9	251
Cámaras				
Encapsulado en el reactor	2	6	14	399 (a)
Encapsulado en nueva instalación	6	6	16	504
COMBUSTIBLE COMPACTADO				
Piscinas	10	5	11	281
Contenedores	11	9	1	110
Pozos				
Encapsulado en el reactor	8	7	2	112
Encapsulado en otra instalación	12	7	8	240
Silos				
Encapsulado en el reactor	9	8	4	131
Encapsulado en una nueva instalación	14	8	7	232
Cámaras				
Encapsulado en el reactor	13	10	12	285
Encapsulado en nueva instalación	15	10	15	406

(a) Si la cámara se construye en cuatro incrementos de capacidad, con el módulo inicial y las instalaciones auxiliares terminadas antes de la entrada en servicio de la instalación, el coste disminuiría a 299 \$/kg, ocupando el lugar 11 en vez del 14 en coste unitario.

(1) DOE-AC09-80ET 47929 Johnson Associates, Inc.

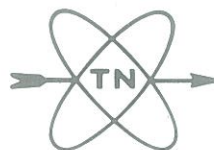


Dentro del campo del tratamiento de Residuos Radiactivos, TRANSNUCLEAR, S. A. ofrece los siguientes servicios:

- Acondicionamiento
- Reducción de volumen
- Desmantelamiento
- Transporte

Igualmente, puede suministrar:

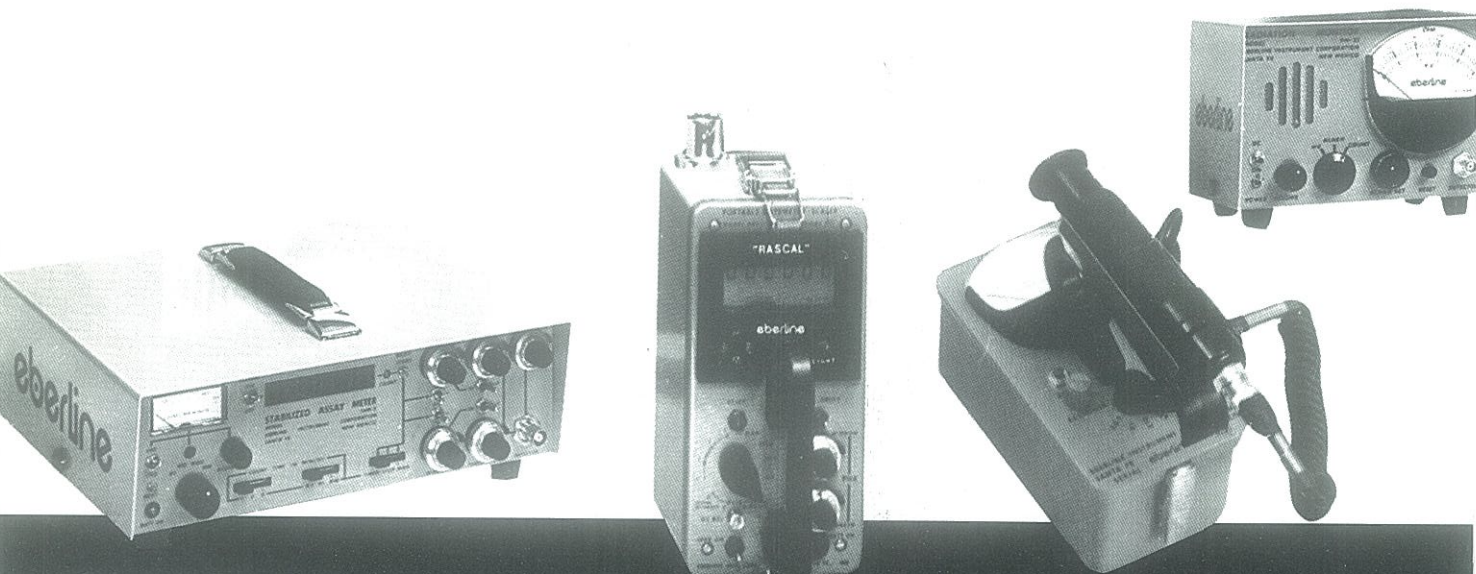
- Contenedores de alta integridad en acero y hormigón
- Contenedores de almacenamiento y transporte para combustible irradiado



TRANSNUCLEAR, S. A.

Hermosilla, 57 - Telf. 431 12 33

Telex: 23042 - MADRID-1



- Monitores y Sistemas de Vigilancia de la Radiación en Areas y Procesos para Operación Normal y de Emergencia.
- Instrumentación Radiológica.
- Dosímetros de bolsillo digitales y analógicos.
- Cámaras de TV. resistentes a la radiación y sistemas de video.
- Instrumentación sísmica.
- Instrumentación hidrográfica.

EBERLINE

**EBERLINE
AUTOMESS
PHYSIOTECHNIE
AUTOMESS**

HYDROPRODUCTS

TELEDYNE GEOTECH

DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO PARA ESPAÑA:

ELVIRIO, S. A.

Plaza Marques de Salamanca, 9
MADRID-6

Tels. 435 90 86 - 435 94 62 - Tlx. 22587 AUSTRI E