

JAVIER TOVAR

INSTALACIÓN DE BASTIDORES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE GASTADO EN PISCINAS

Experiencias en el mundo

En el artículo se analiza la evolución del diseño de los bastidores de almacenamiento en piscina, así como el empleo de distintos materiales de las celdas y los nuevos procedimientos de fabricación desarrollados para cumplir los últimos y más exigentes requisitos impuestos por el diseño.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento en agua de combustible nuclear irradiado ha sido una práctica normal en la gestión del combustible durante los últimos 40 años, prácticamente desde el inicio de la industria nuclear.

Las piscinas se han utilizado casi universalmente para el almacenamiento inicial del combustible gastado que se descarga de los reactores, y actualmente las piscinas se utilizan en muchos países para el almacenamiento permanente.

Todo reactor en operación lleva anexo una piscina de combustible gastado. La piscina se llena con agua desmineralizada, normalmente hasta una profundidad de 12 metros, que sirve como un almacén de combustible. El agua desmineralizada rodeando las barras del combustible constituye un medio adecuado para el combustible nuclear. Los reactores de agua a presión contienen en la piscina unas concentraciones mínimas de boro en forma de ácido bórico, que sirven como una fuente absorbente redundante de neutrones. Las piscinas de los reactores tipo BWR utilizan únicamente agua desmineralizada.

La abundancia natural de agua, junto con sus propiedades termofísicas y neutrónicas, constituye un medio ideal para el almacenamiento de combustible nuclear.

El hidrógeno en la molécula de agua es un excelente desactivador neutrónico, y unos tres metros de agua dan blindaje suficiente para la radiación gama. Además el agua es un excelente medio para el transporte de calor, con un grado de eficacia 100 veces

mayor que el aire o el gas inerte, y consecuentemente los elementos de combustible pueden almacenarse con disposiciones compactas sin peligro de sobrecalentamiento.

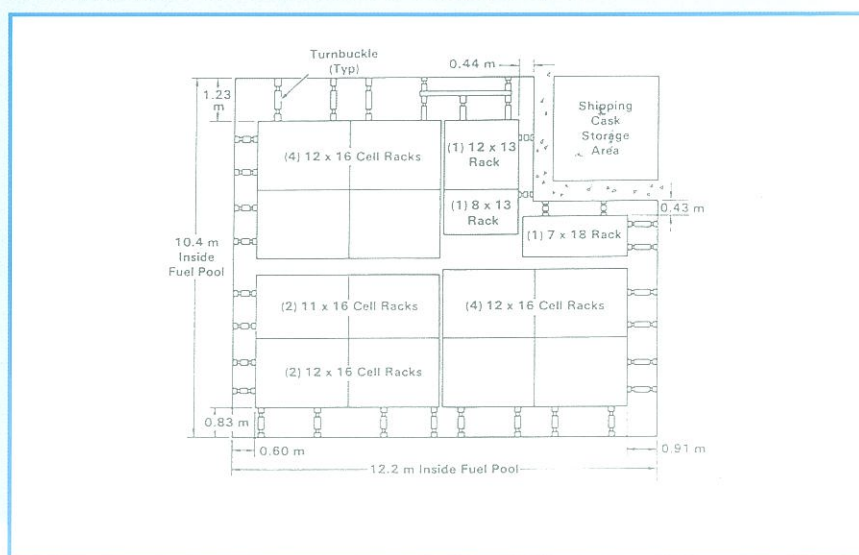
DISEÑO DE LAS PISCINAS DE ALMACENAMIENTO

La mayoría de las piscinas de almacenamiento de los reactores de agua ligera son rectangulares de 10-20 metros de largo por 7-15 metros de ancho. Estas piscinas tienen

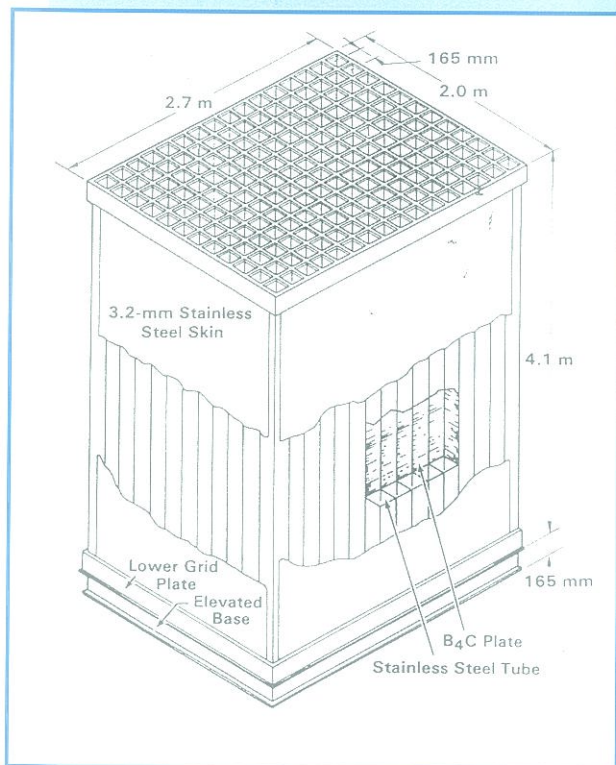
normalmente una profundidad de 12-13 metros, lo que permite que haya al menos tres metros por encima de los elementos de combustible durante las operaciones de manipulación del combustible, lo que provee de una protección contra la radiación para el personal de operación.

Las piscinas se construyen generalmente de hormigón armado, y en la mayoría de los casos la piscina se reviste con una chapa de acero austenítico que además de facilitar la descontaminación proporciona un medio adecuado para colocar los bastidores de almacenamiento de combustible.

F 1. Distribución típica de almacenamiento de combustible gastado en piscinas de reactor BWR en EE.UU.



F II. Bastidor típico para el almacenamiento de combustible gastado en una planta BWR (celdas 12x16)



DESCRIPCIÓN DEL BASTIDOR

Los elementos de combustible gastado se almacenan en la piscina en unos bastidores situados en su fondo. Estos bastidores contienen los elementos de combustible espaciados adecuadamente para el control de la criticidad. Una disposición típica en la piscina de bastidores de combustible gastado de una planta BWR se muestra en la Fig. I.

Un típico bastidor para el almacenamiento de combustible gastado en esa piscina se muestra en la figura II.

Los bastidores de combustible gastado son estructuras celulares de sección prismática, con un diseño que varía de un diseñador a otro, pero con un conjunto de características comunes que se resumen a continuación:

- todos los racks se configuran con una abertura y altura suficientes para permitir la inserción y la retirada de los elementos de combustible nuclear.
- las celdas están distribuidas de forma cuadrada o rectangular y se sujetan mediante unas conexiones apropiadas y/o soldaduras.
- el posicionamiento de las celdas se hace con orientación en vertical y se apoyan en una placa base sobre piscina, utilizando varias patas de soporte para el nivelado.
- en la mayor parte de los casos el material principal de la estructura es de acero austenítico, y a veces con los diseños más antiguos de aleaciones de aluminio.

EVOLUCIÓN DEL ALMACENAMIENTO HÚMEDO

Anterior a la firma del "Non Proliferation Act" en 1976 y la posterior política americana para el re-procesado del combustible, el almacenamiento húmedo fue considerado como una solución transitoria. Consecuentemente, los bastidores de combustible gastado tenían una gran separación entre las celdas individuales, y una gran separación entre los bastidores dentro de la piscina. Adicionalmente, una parte considerable de la piscina estaba ocupada por bastidores de almacenamiento sin combustible. Cuando al final de los setenta, se hizo obvio que el combustible gastado permanecería más tiempo en las centrales, la industria nuclear descubrió el gran potencial disponible en

las piscinas. Consecuentemente, la configuración de los bastidores para el almacenamiento de combustible gastado evolucionó hacia una estructura celular compacta, con los bastidores colocados muy próximos unos junto a otros y a las paredes de la piscina, hasta los límites permitidos por la criticidad y las condiciones estructurales de la piscina.

La evolución de los bastidores es fácil de comprender analizando la terminología utilizada. Desde los bastidores de baja densidad utilizados originariamente hasta los bastidores de alta densidad utilizados durante los ochenta, y actualmente los bastidores de máxima densidad, lo que de hecho significa bastidores especialmente diseñados para el más eficiente uso del espacio disponible en la piscina, con la mínima separación posible entre elementos.

De esta forma, piscinas para combustible gastado originalmente diseñadas para almacenar menos de dos núcleos de combustible, han sido equipadas para almacenar más de diez, sin disminuir los márgenes de seguridad, y en muchos casos incrementándolos.

MEJORAS EN LOS BASTIDORES

Durante este desarrollo, varios aspectos claves se han tenido que reconsiderar:

- inclusión de venenos neutrónicos
- aceptación del crédito al quemado
- evolución de los programas de cálculo
- nuevos materiales más adecuados

- técnicas automatizadas y más precisas
Para una comprensión más apropiada de estos cambios, un análisis más detallado se expone a continuación:

- INCLUSION DE VENENOS NEUTRÓNICOS

La primera mejora en los bastidores fue la incorporación de un absorbente neutrónico a la estructura de acero inoxidable lo que permite un posicionamiento más próximo de las celdas sin que afecte a la criticidad. Con esta mejora es posible reducir de 330 a 267 mm la distancia entre centros con un elemento estándar de un PWR: Tres soluciones diferentes basadas en la adición de Boro se han utilizado:

Boraflex ®, Boral ®, acero inoxidable borado.

® Boraflex es una marca registrada de Bisco Products Inc.

® Boral es una marca registrada de AAR Brooks & Perkins

En los siguientes epígrafes se hace una breve descripción de cada producto, sus ventajas y sus inconvenientes.

BORAFLEX ®

El Boraflex se asemeja a una plancha de goma. De hecho, es un B4C en forma de silicona de goma, utilizada en secciones delgadas normalmente de 1 a 2 mm.

Este fue el primer producto aprobado por la NRC a finales de los setenta y ha sido ampliamente utilizado desde entonces, principalmente en USA, en más del 50 % de los bastidores de alta densidad.

Ventajas:

La principal ventaja es el precio, que es prácticamente la mitad que con otras soluciones.

Desventajas:

El Boraflex ha mostrado durante esta serie de años una serie de problemas, tales como:

- debido a la irradiación se transforma en un producto duro estilo cerámico, con grietas y pequeños poros en la superficie. Simultáneamente, se ha detectado un engorgiamento del orden del 3%, causando problemas de criticidad.
- con la exposición a la irradiación los bordes de los paneles del Boraflex se deterioran por la lixiviación del B4C, a una tasa aproximada de 3 mm en 10 años.
- debido a estos problemas detectados, el Boraflex necesita de un programa de vigilancia.

Como consecuencia de estos problemas, la producción de Boraflex se detuvo en 1992.

BORAL®

El Boral se asemeja a una chapa de aluminio. Es realmente un sandwich de una aleación de 50 % de B4C en aluminio 1100, con dos

capas externas de aluminio 1100. El espesor normal va de 1,5 a 3 mm, en función del % de B requerido.

Ventajas

La solución del Boral desde el punto de vista de materiales es algo más barato que su competidor actual, el acero inoxidable borado.

Desventajas

Con este material no se han detectado problemas importantes. No obstante, algunos comentarios al respecto pueden hacerse.

- Reacción inicial entre el aluminio y el agua produce H_2 . En el pasado este hidrógeno ha producido un hinchamiento en la pared de la celda. Este problema se ha resuelto haciendo algunos agujeros en la celda para ventilación o recurriendo a no sellar las celdas durante su fabricación.
- Se ha detectado alguna pequeña corrosión galvánica en el aluminio, en las áreas de contacto con el acero inoxidable, principalmente en las plantas PWR, debido al PH (≈ 5) del ácido bórico presente en el agua de la piscina, que es además muy sensible a los cambios de conductividad del agua de la piscina.
- Posibilidad de una lixiviación del boro, que está siendo considerado por la NRC.

ACERO INOXIDABLE BORADO

El acero inoxidable borado es un acero inoxidable AISI 304 ó 347, que contiene de 1,6 % a 1,9 % de boro, dispersado finamente en forma de precipitado de boruro de cromo en una matriz austenítica. No tiene interés aumentar el contenido de boro más del 1,9 % dado que por encima de este nivel la reactividad (K) permanece prácticamente constante (Fig. III) y porque su baja ductilidad aumenta considerablemente los problemas de fabricación. El espesor normal varía entre 2 y 3 mm.

Ventajas

- Material conocido por su estabilidad, resistente al agrietado por corrosión y a la corrosión intergranular.
- Subcrítica asegurada durante al vida del producto.
- No se necesita supervisión de las pruebas con los cupones.

Desventajas

- Alto precio
- Material frágil. No es posible un doblado o plegado importante.

Conclusión

El acero inoxidable borado es la solución preferida para garantizar la criticidad y la integridad física, pero el precio puede ser determinante con esta opción.

El boral también puede utilizarse pero necesita más control y seguimiento, lo que puede mitigarse por su precio menor.

ACEPTACIÓN DEL CREDITO AL QUEMADO

El crédito al quemado consiste en aceptar que el combustible gastado tiene un grado de enriquecimiento menor que el combustible fresco y consecuentemente asumiendo el compromiso de un adecuado control administrativo de cada elemento de combustible, permite considerar esta hipótesis para los cálculos de criticidad.

Cuando al final de los años ochenta, las regulaciones internacionales permitieron que el grado de quemado se incluyese en los cálculos de criticidad, hizo posible reducir el contenido de boro y la distancia entre centros (pitch) de las celdas.

Como el crédito al grado de quemado, se aplica solamente con los elementos de combustible de las PWR con mínimo grado de quemado (Fig. IV), obliga a disponer en la piscina de una zona segregada para un núcleo de combustible fresco, para cubrir cualquier eventualidad de remover elementos frescos del reactor. Esta es la razón por la cual se considera el crédito al grado de quemado, siendo necesario distinguir dos zonas dentro de la piscina: una para combustible fresco o bajo grado de quemado, normalmente conocida como Región 1, y otra de combustible gastado conocida como Región 2.

La Región 1 está constituida por 1 ó 2 bastidores de un espesor mayor de la pared de la celda y 4 planchas de material absorbente neutrónico rodeando cada elemento, éstos es, dos paneles de absorbente neutrónico entre cada dos elementos de combustible.

La Región 2 está normalmente formada por

celdas de pared más delgada dispuestas como un tablero de ajedrez, lo que supone sólo un absorbente en la pared entre elementos de combustible (Fig. V).

EVOLUCIÓN DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO

Otro aspecto importante en la reducción del espesor de la estructura y del material absorbente y la distancia entre centros de las celdas, es la mejora alcanzada durante los últimos años con los programas de cálculo de la criticidad, el térmico y el sísmico. La utilización de la metodología del análisis dinámico, el avance en los programas de ordenador para el cálculo con elementos finitos e hidrodinámica, y las mejoras en las nuevas ediciones de los códigos DINARACK, SCALE, y KENO-V.a, ha permitido demostrar la validez de los nuevos diseños, evitando un enfoque conservador que afecta a la optimización de la piscina.

La aplicación de estas nuevas metodologías y programas, ha permitido alcanzar importantes metas en la batalla para la optimización de la piscina.

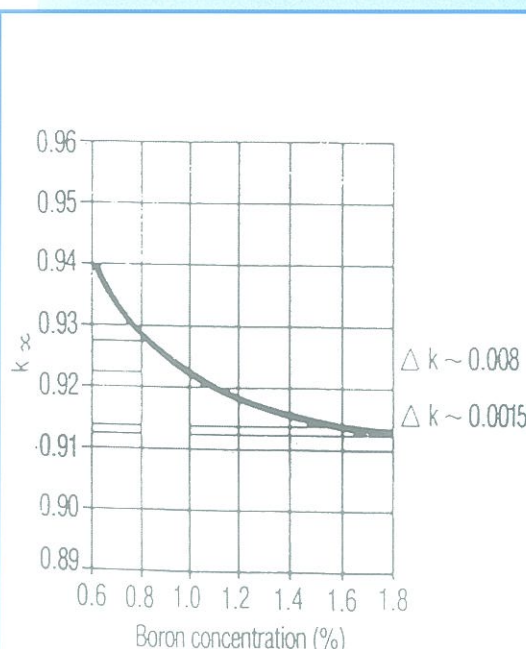
Algunos ejemplos pueden ser:

- La utilización de bastidores autoportantes en lugar de los bastidores de diseño anclados, ha posibilitado ganancias importantes de espacio en la piscina, eliminando algunos dispositivos laterales como se muestran en la figura I. Al mismo tiempo, se ha conseguido una importante reducción del tiempo en la instalación de los bastidores así como los problemas que se derivan del daño al liner.
- El cálculo estructural de la piscina permite ahora cargar la piscina con un considerable número mayor de elementos combustibles.
- La veracidad y la capacidad de los códigos para simular la criticidad permite llegar a una distancia mínima entre centros de celdas.
- Las consideraciones termohidráulicas que se hacen en los nuevos modelos de ordenador para el cálculo de transferencia del calor, considerando los efectos de enfriamiento del agua de la piscina por evaporación, con frecuencia justifican la colocación de un número máximo de elementos en la piscina, sin modificar los elementos existentes de enfriamiento, y en algunos casos reduciéndolo considerablemente.

NUEVOS MATERIALES MAS ADECUADOS

Un mejor conocimiento de los materiales para la fabricación de los bastidores ha permitido en algunos casos descartar materiales problemáticos,

F III. Factor de Multiplicación versus contenido de Boro



como el Boraflex y con otros mejorar la calidad y las propiedades, y simultáneamente reducir su precio, como en el caso del acero inoxidable borado. Las principales ventajas relacionadas con los materiales son:

- El hidrógeno que se forma en la reacción inicial del aluminio contenido en el boral con el agua de la piscina es ahora controlada mediante unos agujeros que permiten la ventilación, lo que evita el hinchamiento de la celda.

- La susceptibilidad del boral a la corrosión galvánica se minimiza con un adecuado control de la química del agua y el valor de su conductividad.

- La tecnología de fabricación del acero borado ha mejorado notablemente mediante la técnica de inducción en vacío, y más recientemente la tecnología de polvo de aleación en gas inerte seguido de una consolidación hasta una densidad total mediante presión isostática, lo cual produce unos boruros más finos y mejor distribuidos y consecuentemente una mejora en la dureza del material.

- El problema de la fragilidad del acero inoxidable borado, no muy importante para el diseño de bastidores, puede resolverse con la adición de boro enriquecido con el isótopo B10 lo que permite una reducción importante del contenido de boro y una mejora sustancial de la dureza. Desafortunadamente, el precio sube considerablemente con la adición del B10 al boro.

TÉCNICAS MAS PRECISAS Y AUTOMATIZADAS DE FABRICACIÓN

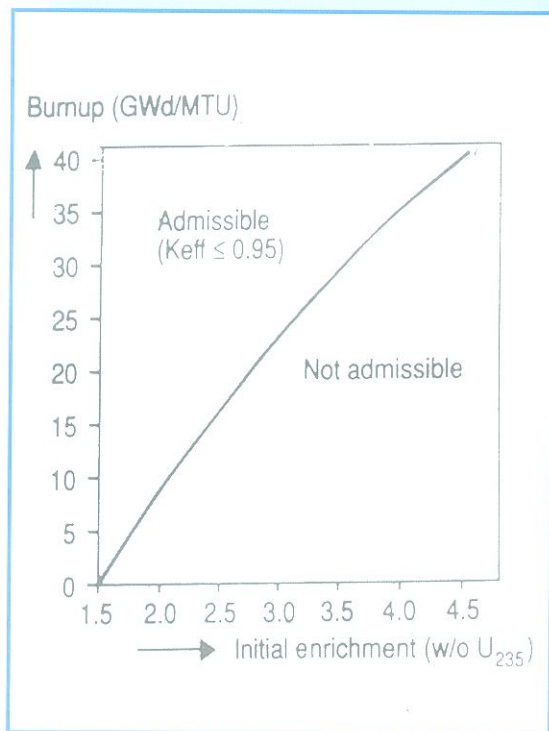
La utilización de espesores menores y la reducción de la distancia entre centros de celdas y consecuentemente las tolerancias de diseño ha constituido un permanente desafío para los fabricantes de bastidores. Para resolver estos inconveniente ha sido necesario instrumentar unos procedimientos de soldadura más precisos y automatizados, así como desarrollar utillajes y sistemas que garanticen un montaje más preciso.

Una explicación más detallada de estos temas se expone a continuación.

FABRICACIÓN DE LOS BASTIDORES

El bastidor para el almacenamiento, aunque aparentemente parece una estructura simple ofrece bastante dificultad en su fabricación, debido a la necesidad de utilizar materiales de poco espesor, lo que significa susceptibilidad a la distorsión y a la deformación, y a una reducción permanente de las toleran-

F IV. Áreas admisibles para el crédito de quemado



cias de fabricación por parte de los diseñadores.

La historia reciente de la fabricación de bastidores está llena de casos de fabricantes importantes en el campo nuclear que han fracasado visiblemente en la fabricación de bastidores.

Algunos casos llamativos de bastidores totalmente inaceptables por violación de la criticidad, excesivas tolerancias y celdas que han tenido que ser bloqueadas, se han producido desafortunadamente en estos últimos años.

Para evitar estos problemas, es necesario conocer las características y el comportamiento de los materiales utilizados, para definir el proceso y la secuencia adecuados de fabricación, desarrollar los utillajes y las máquinas y robots necesarios, y cualificar los procesos automatizados de soldadura.

Los errores del pasado han dado lugar a que solo exista un fabricante de bastidores en USA y pocos más en el mundo.

En Europa, Equipos Nucleares ha acumulado una gran experiencia en la fabricación de bastidores, con más de 60 instalaciones de bastidores de alta densidad, de diferentes diseños, suministrados durante los últimos cuatro años a diferentes países de Europa y Asia, con una ejecutoria sorprendente de ninguna reclamación.

Adicionalmente, Equipos Nucleares ha participado en el diseño y desarrollo de bastidores específicos de máxima densidad, mejorando el diseño inicial con nuestra propia experiencia.

El desafío de la fabricación de bastidores requiere la selección, previa y cualificación

de procedimientos que garanticen las dimensiones exigentes que se necesitan para los bastidores de hoy en día, de una máxima densidad así como la calidad y dimensiones mínimas de miles de metros de soldadura.

En 1990 Equipos Nucleares estudió la posibilidad de desarrollar un nuevo proceso para producir las celdas de los bastidores con una menor distorsión y una mayor productividad que con el sistema tradicional de soldadura horizontal MIG/TIG en dos etapas.

El procedimiento con plasma fue el seleccionado debido a unos inputs con menos calor, y se desarrollaron además cuatro cabezales de soldadura automática para soldar simultáneamente los cuatro ángulos de la celda.

Finalmente, un sistema preciso para el desplazamiento de la celda permite desplazar verticalmente la celda durante el proceso de soldadura a una velocidad constante.

Una soldadura de gran calidad y alineación, con adecuada y constante penetración, buena reproducción de resultados, han constituido elementos destacados en la fabricación.

Ocho meses más tarde, la primera máquina en el mundo de soldadura por plasma, automática, comenzó a fabricar celdas de bastidores de acero inoxidable borado con unos resultados excelentes.

Junto con la máquina anterior, otras máquinas programables de control remoto, automáticas, utilizando el proceso de soldadura MIG en horizontal y vertical se vienen utilizando para la fabricación de bastidores.

Se ha desarrollado utillaje y herramienta especial para control y compensar las tensiones en las soldaduras durante la fase de montaje de los bastidores al objeto de garantizar una alineación correcta de las celdas. También, durante el montaje de los bastidores, para compensar las tensiones en las soldaduras, se diseña la secuencia específica preparada y verificada mediante ordenador. La secuencia de fabricación de bastidores de alta densidad varía de un diseño a otro, pero en todos los casos incluye:

- máquinas de control numérico para la placa base
- construcción individualizada de las celdas
- comprobación con un "dummy" de la sección y alineación de las celdas
- comprobación de la contaminación ferítica, previo lavado cuidadoso de cada una de las celdas
- comprobación final dimensional y funcional
- otro lavado cuidadoso y control de la contaminación
- preparación especial para el transporte

que permita mantener la condición de limpieza señalada hasta su posterior instalación en la piscina.

Finalmente, en lo que respecta a los requisitos de garantía de calidad para este tipo de fabricación, se requiere cumplir con el Código ASME Sección II, III-NCA y NF, V e IX, ó requisitos similares de otros códigos para garantizar que los materiales, procedimiento y personal están debidamente capacitados. Equipos Nucleares consiguió en 1978 y mantiene hasta la fecha, la cualificación ASME, que nos autoriza la fabricación de componentes y sistemas nucleares.

INSTALACIÓN DE LOS BASTIDORES

La actividad de Equipos Nucleares consiste en la fabricación de los bastidores, la extracción de los bastidores viejos y la instalación de los nuevos en la piscina. Durante los últimos tres años Ensa ha instalado más de 50 bastidores, lo que le ha proporcionado una gran experiencia y confianza de los clientes.

En la operación de la instalación hay diferentes operaciones que se han de hacer con cuidado y en el menor tiempo para evitar demoras costosas en la planta. La simple mención del alcance nos da una idea de la dificultad y el grado de especialización requerido:

- Remoción y descontaminación de los bastidores existentes.
- Manejo de los elementos de combustible gastado.
- Corte, modificación y reinstalación, cuando sea necesario, de la tubería de enfriamiento de la piscina.
- Estudio del estado de la piscina.
- Instalación y nivelación de los bastidores nuevos.
- Pruebas funcionales con los nuevos bastidores y equipos instalados.

Para realizar correctamente estas operaciones, se necesita utilizar equipos especiales manejados a distancia:

- máquinas electromecánicas de corte y plasma bajo el agua
- equipos de soldadura bajo el agua
- control con TV bajo el agua
- equipos de control dimensional ópticos

Adicionalmente, se necesitan instalar en el área de la piscina equipos auxiliares para ejecutar esas operaciones.

Un ejemplo:

- equipos para filtración y descontaminación del agua de la piscina
- grúa auxiliar en la piscina
- sistema auxiliar de enfriamiento del agua de la piscina

Finalmente, el personal que intervenga en estas operaciones necesita un entrenamiento previo y experiencia en trabajos en esas

instalaciones, utilizar equipos sofisticados y manejo de los Códigos ASME y otros Códigos de Garantía de Calidad.

La descripción de las actividades mencionadas puede inducir a creer que el trabajo de instalación de bastidores en la piscina es una operación muy complicada, pero no es así. Si el trabajo se ha preparado convenientemente y el personal que intervenga tiene las habilidades y experiencia requeridas, después de remover de la piscina todos los posibles obstáculos, los módulos de los bastidores pueden instalarse en la piscina en un tiempo reducido.

CONCLUSIONES

La instalación de bastidores en las piscinas de las centrales nucleares puede considerarse una operación segura, rápida, no cara y fácil de operar y consecuentemente como una solución muy conveniente para resolver, al menos temporalmente, el problema de la saturación en la capacidad de las piscinas existentes.

La incorporación de los materiales absorbentes de neutrones, nuevos y más potentes códigos y programas de cálculo, la consideración del crédito al quemado por las autoridades reguladoras, así como la mejora en los materiales, procedimientos de fabricación e instalación, ha posibilitado que la instalación de nuevos bastidores sea una solución adecuada para el almacenamiento temporal de los elementos de combustible gastado, hasta que sea aprobado el emplazamiento del almacenamiento definitivo.

No obstante, dado que existen límites en la capacidad de las piscinas existentes actualmente en las centrales nucleares, existen otras opciones que están siendo consideradas para resolver este problema, y las más interesantes son:

- consolidación de las barras de combustible
- adición de una piscina independiente de almacenamiento
- almacenamiento en seco en módulos metálicos o de hormigón
- almacenamiento en seco en contenedores de doble o multipropósito
- almacenamiento en pozos secos o silos

F.V. Bastidores de almacenamiento de alta densidad

SIEMENS

High-Density Storage Racks

Why do we install high-density storage racks?

- to enlarge pool storage capacity for entire plant service life
- compact storage option for spent fuel
- proven, established technique
- substantially ensured
- easy to install due to pre-assembled modular design
- well suited for long-term storage

Why do we use boron stainless steel for neutron absorbers?

- boron homogeneously incorporated in the austenitic matrix
- substantially ensured over entire life
- no deformation, degradation, swelling, delamination
- resistant to stress corrosion cracking and any other type of selective corrosion, such as intergranular corrosion
- no corrosion inspections
- no additional radiation exposure of operating personnel
- considerable experience: more than 25,000 absorber channels manufactured over 15 years
- easy decommissioning and decommissioning

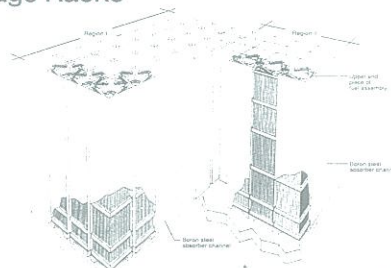
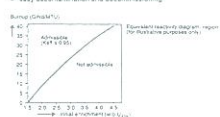


FIG. 5

La selección de las condiciones apropiadas de almacenamiento para una central en particular, depende de un mínimo de factores, tales como:

- el tiempo y la cantidad de los requisitos en capacidad para el almacenamiento adicional
- consideraciones financieras
- consideraciones legales e institucionales

La complejidad de estos factores y su relación con las opciones disponibles, hace que el mecanismo apropiado para proporcionar capacidad de almacenamiento adicional, haya que determinarlo caso por caso.

No obstante, en aquellos casos en los que la instalación de nuevos bastidores sea una opción aceptable, ésta debería considerarse como la opción prioritaria.



Javier TOVAR es jefe de Ingeniería de Proyectos de Equipos Nucleares, S.A. donde trabaja desde 1976.

Ingeniero experto en materiales, procesos de fabricación y Códigos de diseño y construcción nucleares, ha sido jefe de diversos proyectos, varios de ellos relacionados con el almacenamiento de combustible gastado, tanto por vía húmeda (reracking) como en seco (contenedores).

Ha colaborado con artículos y conferencias con organizaciones nacionales e internacionales como IAEA, INMM, OCDE, SNE, ATE-SOL, etc. Miembro de ASTM y ASME.