

Fukushima: el plan de estabilización y control de la central

E. Gallego

Se describen de forma panorámica los pasos e hitos principales que comprende el plan de estabilización y recuperación de la central de Fukushima-Daiichi, con los logros alcanzados hasta conseguir una refrigeración estable y llegar a la parada fría de los reactores, mantener la refrigeración de las piscinas, detener prácticamente por completo de las descargas radiactivas, gestionar y reutilizar cantidades enormes de agua contaminada, limpiar el emplazamiento y aislar la unidad 1. También se presentan sucintamente las etapas previstas posteriormente hasta llegar al desmantelamiento de la central, pasando por la extracción del combustible de las piscinas, y en una fase posterior mucho más delicada, del material fundido de los núcleos de los reactores y el resto de materiales y residuos altamente radiactivos.

The paper offers a panoramic view of the main steps and targets of the Roadmap towards restoration of the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station, with the main achievements until maintaining a stable cooling and reaching cold shutdown conditions in the reactors, keeping stable cooling of the spent fuel pools, practically stopping all radioactive leakages, managing and reusing huge amounts of contaminated water, cleaning the site and isolating the reactor unit 1. The next phases up to the end of the total decommissioning are also briefly described, including the extraction of fuel from the pools and, much more delicate later operations needed to extract the melted material from the reactor cores and the rest of highly radioactive debris produced.



EDUARDO GALLEGO

es Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Director del Departamento de Ingeniería Nuclear de la UPM. Vicepresidente de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Ha divulgado mediante múltiples entrevistas y conferencias la evolución del accidente de Fukushima-Daiichi y sus consecuencias.

INTRODUCCIÓN

Desde los primeros días tras el accidente en la central nuclear de Fukushima, se empezaron a dar pasos para tratar de restablecer el control sobre los reactores, comenzando por intentar restablecer el suministro eléctrico, cuya pérdida originó la falta de control sobre los reactores y las piscinas de almacenamiento de combustible usado. El 17 abril de 2011, Tepco presentó la hoja de ruta para la recuperación de la central, que se basaba en esencia en cinco grandes cuestiones: recuperar la refrigeración de los reactores y de las piscinas, reciclar y reducir la cantidad de agua acumulada, prevenir la contaminación de acuíferos y escapes subterráneos de agua acumulada, así como de nuevos escapes atmosféricos y proceder a la limpieza de suelos del emplazamiento. Las actuaciones han requerido un esfuerzo sin precedentes, en condiciones muy precarias y delicadas desde el punto de vista radiológico, pese a lo cual el pasado 15 diciembre de 2011,

se pudo declarar el estado de “parada fría de los reactores” y la conclusión de las dos primeras etapas del plan.

REFRIGERACIÓN DE LOS REACTORES

En una primera fase, la estrategia para poder refrigerar los reactores se basó en conseguir inundar la caldad de contención, o pozo seco, hasta un nivel superior al que originariamente ocupaba el núcleo de los mismos. De esa manera, se buscaba extraer el calor, aunque fuese desde el exterior de la vasija. Sin embargo, la gran cantidad de agua inyectada, fundamentalmente mediante equipos externos como bombas de lucha contra incendios y otros, unido a los daños que las contenciones habían sufrido, provocaron un trasvase de grandes cantidades de agua con niveles de contaminación muy elevados hacia los edificios de turbina y auxiliares. Por ello, el objetivo que el plan de control establecía era conseguir recircular dicha agua, depurándola y desalándola, para se-

guir empleándola en la refrigeración de los reactores. Esto se consiguió a partir de finales de junio de 2011, y constituyó un hito fundamental en la lucha contra la acumulación de agua fuertemente contaminada.

Con respecto al estado de los reactores, parece seguro que todo el combustible del reactor número 1 se encuentra fundido y fuera de la vasija (Figura 1), habiendo caído a la cavidad del reactor, en donde se ha debido producir una interacción *corium*-hormigón, que se logró interrumpir al proseguir la inyección de agua. Los reactores números 2 y 3, que permanecieron menos tiempo sin refrigeración, mantendrían parte del combustible dentro del núcleo, habiendo caído parte ya fundido al fondo de la vasija, y tal vez otra pequeña parte podría haber salido a la cavidad del reactor (Figura 1), si bien hay grandes incertidumbres en este tipo de estimaciones. En todo caso, parece constatado que todos los materiales se encuentran en estado sólido

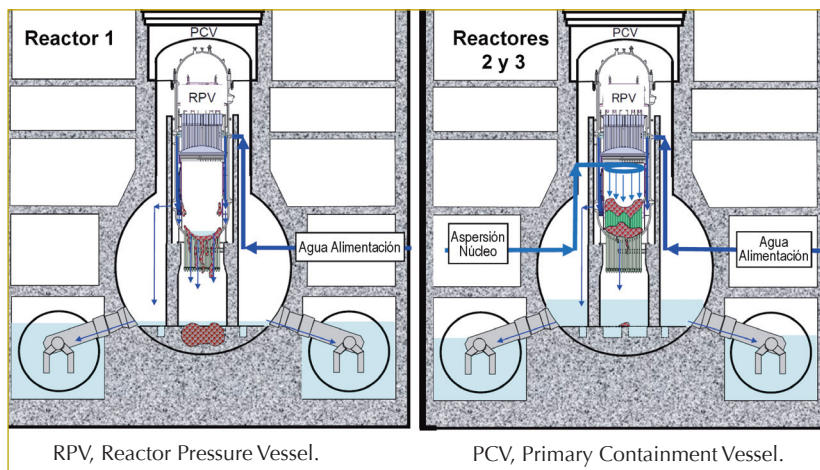


Figura 1. Esquemas representando el posible estado de los reactores dañados de la central de Fukushima-Daiichi, según cálculos de Tepco con el código MAAP. Izquierda: reactor 1; derecha: reactores 2 y 3 (adaptado de la presentación de Tepco, 30 de noviembre de 2011).

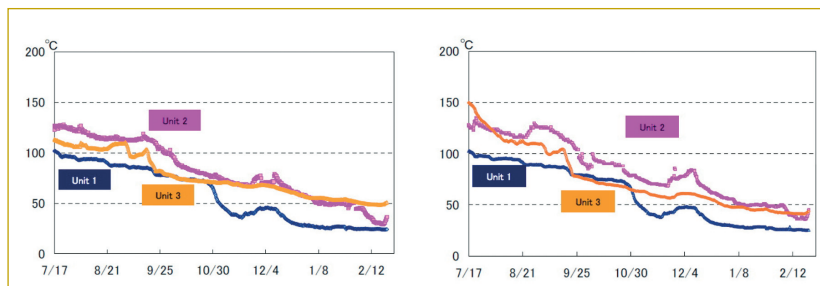


Figura 2. Evolución de las temperaturas medidas en el fondo de la vasija (izquierda) y promedio del pozo seco (contención primaria) entre julio de 2011 y febrero de 2012 en los distintos reactores (adaptado de la presentación de Tepco marzo 2012).

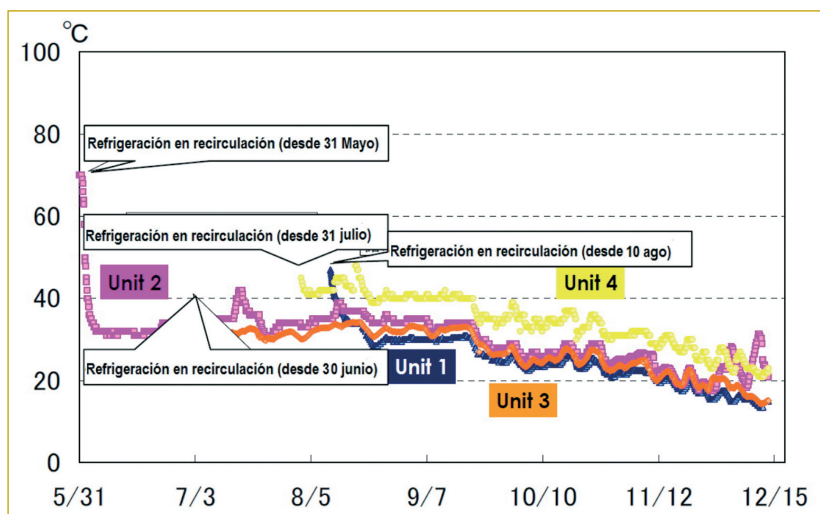


Figura 3. Evolución de las temperaturas medidas en las piscinas de enfriamiento del combustible usado. Se indican las fechas en que la refrigeración en recirculación comenzó a operar en cada unidad. (Adaptado del informe de Tepco "Roadmap towards Settlement of the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO" Step 2 Completion Report, 16 December 2011).

y refrigerados suficientemente, ya que ha cesado la generación de vapor y la liberación de productos radiactivos.

La inyección de agua continúa a través de las líneas de agua de alimentación, y desde septiembre también a través del sistema de rociado del

núcleo en los reactores 2 y 3. Los caudales de agua inyectada son de hasta 10 m³/h, lo que permite mantener las temperaturas del fondo de las vasijas en valores del orden o inferiores a 50 °C (Figura 2 izquierda), y las temperaturas medias de los pozos secos en

valores incluso más bajos (Figura 2 derecha). Eventualmente se inyecta nitrógeno en las contenciones para prevenir posibles riesgos por generación de hidrógeno si se produjeran fallos en la refrigeración.

REFRIGERACIÓN DE LAS PISCINAS

El estado del combustible almacenado en las piscinas de enfriamiento parece menos malo de lo que en un principio se temió, como muestran las imágenes difundidas de las mismas. Particularmente crítica era la situación de la piscina del reactor número cuatro, en cuyo edificio se produjo una de las mayores explosiones del accidente, y que además alberga el mayor número de elementos combustibles, y los más calientes, ya que dicho reactor se había vaciado para labores de mantenimiento. Sin embargo al cabo del tiempo se ha conseguido pasar de inyectar agua con medios inusuales a establecer un sistema estable de refrigeración en circuito cerrado, ya disponible en todas las piscinas a partir de agosto (Figura 3). Con ello, se utiliza el propio cambiador de calor de las piscinas, habiendo establecido un circuito secundario refrigerado por aire con torres de tiro forzado. Las temperaturas del agua de las piscinas a finales de febrero estaban entre los 14 y los 26 °C, lo cual es una garantía. Además, se han instalado sistemas de desalación del agua mediante ósmosis inversa, necesarios para reducir la concentración de cloruros cuya influencia sobre la integridad de las vainas de combustible en el largo plazo podría ser nefasta.

ACCIONES DE MITIGACIÓN CON RESPECTO AL AGUA CONTAMINADA ACUMULADA

La acumulación de agua en los edificios del reactor, turbinas y auxiliares, unida a su pérdida de esta entidad debido a los daños causados por el terremoto y posterior tsunami, ocasionaron escapes directos al mar de agua fuertemente contaminada, de gran importancia en los primeros días de abril, e incluso en el mes de mayo de 2011. Por ello, uno de los principales objetivos de la Fase 2 del plan ha sido reducir la cantidad total de agua acumulada, facilitando al máximo su reutilización. Ha sido necesario instalar plantas para el tratamiento continuo mediante separación de aceite y materia grasa, absorción de cesio, coagulación y precipitación de partículas, desalado y evaporación. Estos tratamientos se han mostrado muy

Resumen del estado de las plantas dañadas

Piscina de Combustible

Vasija del Reactor

Pozo seco (contención primaria)

Pozo húmedo (Cámara de supresión de presión)

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4
	 TEPCO	 Ministry of Defense	 Air Photo Service	 Air Photo Service
Vasija del reactor Temperatura en el fondo*	Refrigeración mediante inyección y recirculación de agua 24,3 °C	Refrigeración mediante inyección y recirculación de agua 47,1 °C	Refrigeración mediante inyección y recirculación de agua 51,4 °C	Sin combustible
Pozo seco - Contención primaria Temperatura del aire*	Inyección esporádica de nitrógeno 25,4 °C	Inyección esporádica de nitrógeno 25,4 °C	Inyección esporádica de nitrógeno 25,4 °C	--
Piscina de combustible Temperatura del agua de la piscina*	Refrigeración mediante recirculación de agua 26,5 °C	Refrigeración mediante recirculación de agua 26,5 °C	Refrigeración mediante recirculación de agua 26,5 °C	Refrigeración mediante recirculación de agua 26,5 °C
Agua contaminada en los edificios del reactor y turbinas**	14.100 m ³	22.000 m ³	23.800 m ³	18.300 m ³

* El 24-02-2012 a las 12:00

** El 21-02-2012

Cuadro 1. Parámetros principales sobre el estado actual de los reactores dañados en Fukushima-Daiichi.

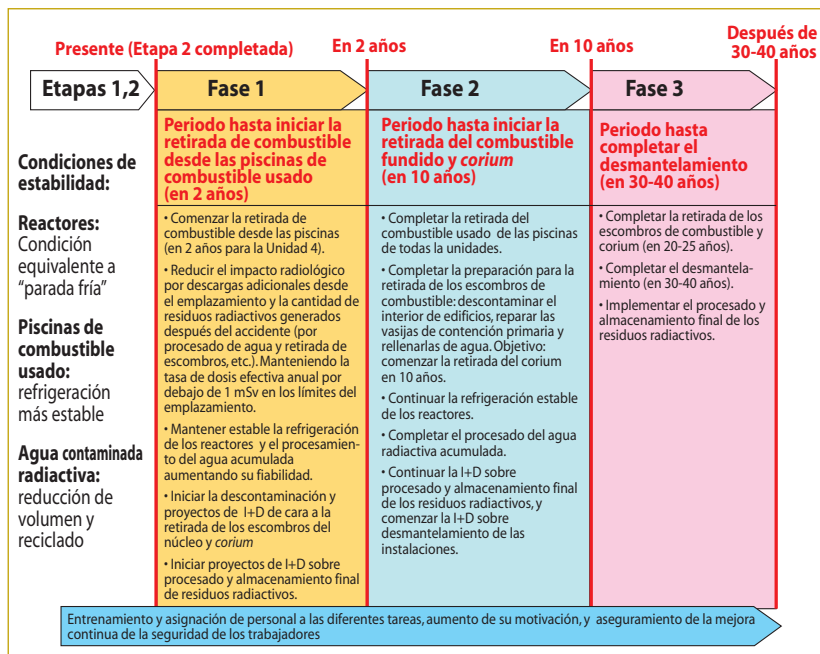


Figura 4. Esquema-resumen del Plan de limpieza y desmantelamiento de la central de Fukushima-Daiichi. (Adaptado de presentaciones de TEPCO y METI, marzo 2012).

eficaces logrando, por ejemplo, reducir la contaminación de 6.000 ppm a 20 ppm mediante la ósmosis inversa, y de 12.000 ppm a 1 ppm mediante la evaporación. En paralelo ha sido necesario preparar sistemas para almacenaje y gestión de los lodos altamente contaminados producidos. La cantidad total de agua procesada no ha cesado de aumentar, y así por ejemplo en diciembre estaba próxima a las 200.000 t. Para almacenar agua contaminada y lodos concentrados, se han instalado múltiples baterías de

tanques de almacenamiento, con resistencia progresivamente mayor según el nivel de contaminación. Con todo ello se ha conseguido hacer descender el nivel de agua en los edificios hasta un punto que aleja el riesgo de desbordamientos en caso de lluvias fuertes (3 m sobre el nivel medio del mar).

A pesar de todo, el volumen de agua en los edificios del reactor y turbina oscila entre los 14.000 m³ en el caso de la unidad 1, 22.000 m³ en la Unidad 2 y 24.000 m³ en la Unidad 3 (21 febrero 2012).

El Cuadro 1 resume la situación de los parámetros principales de los cuatro reactores dañados a finales de febrero de 2012, a punto de cumplirse el primer aniversario del accidente.

PLAN DE LIMPIEZA Y DESMANTELAMIENTO DE LA CENTRAL

A partir de la situación actual, con los reactores dañados pero refrigerados de forma estable, las piscinas de combustible usado debidamente refrigeradas, y habiendo establecido los medios para reducir la cantidad de agua contaminada, los esfuerzos se dirigen hacia conseguir la limpieza y el desmantelamiento total de la central. Este ambicioso objetivo no podrá lograrse antes de 30 o 40 años. El plan, que se esquematiza en la Figura 4, contempla una primera fase de aproximadamente dos años hasta poder comenzar la extracción de combustible desde las piscinas de enfriamiento. La fase posterior, de aproximadamente 10 años, comprende hasta el comienzo de la extracción del material fundido de los reactores. Y la fase final, llevaría hasta el final del desmantelamiento, tras la extracción total de los materiales que un día formaron los reactores 1, 2 y 3 de Fukushima-Daiichi.

Una preocupación constante a lo largo de este plan es la de minimizar los riesgos residuales, empezando por las posibles réplicas de los terremotos que pudieran producirse, para asegurar la integridad estructural de los edificios dañados, así como de todos los sistemas instalados posteriormente para asegurar la fiabilidad del suministro de agua y de electricidad.

Algunas de las acciones más destacadas dentro del plan son las siguientes:

- La interposición de barreras para evitar posibles derrames líquidos hacia el mar. Se han instalado una serie de barreras temporales, mediante sacos de arena en algunos casos con zeolita, cuya capacidad de absorción de cesio es muy notable, barreras de hormigón y de acero, fijadas o deslizantes.
- La construcción de barreras subterráneas, del orden de más de 20 m de profundidad, para evitar la infiltración de agua desde el emplazamiento hacia el mar.
- El control de la presencia de polvo contaminado en el aire, mediante la dispersión de agentes inhibidores de polvo en una superficie de

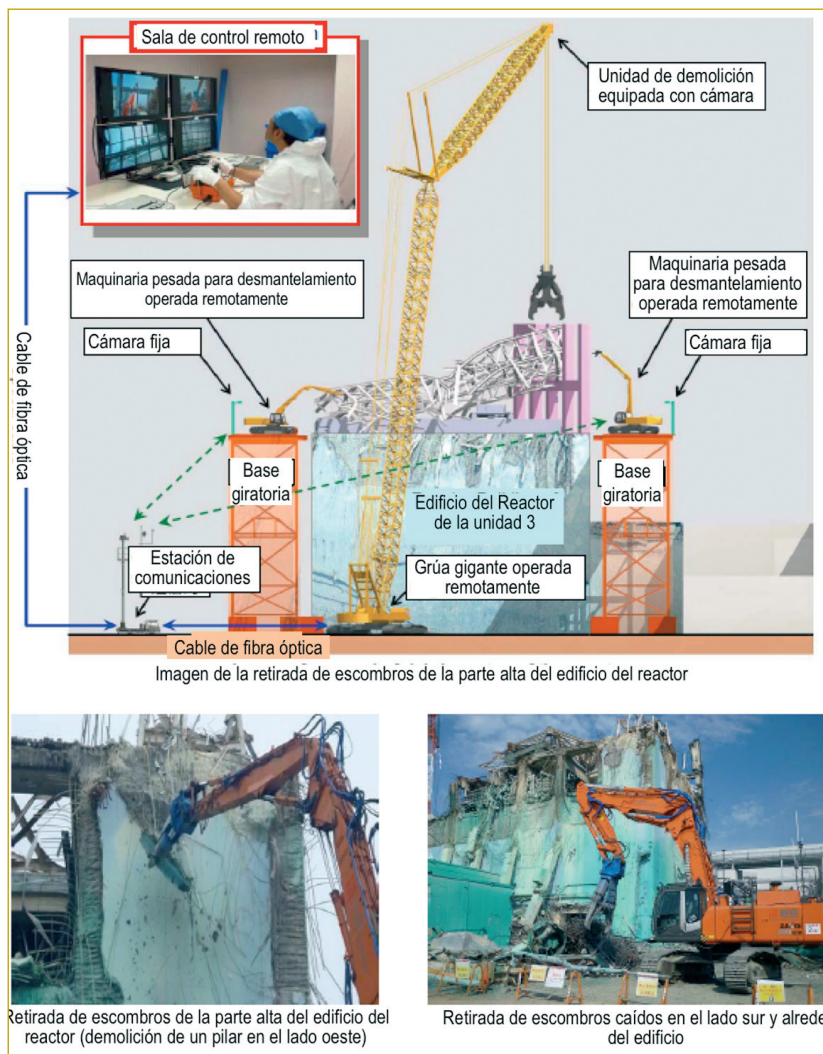


Figura 5. Labores de retirada de escombros del edificio dañado del reactor número 3 (adaptada de Tepco).

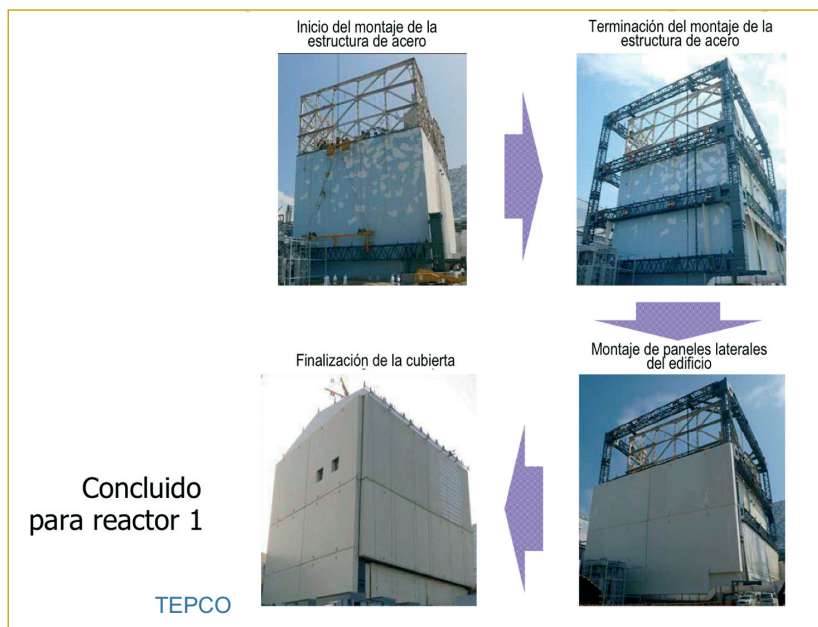


Figura 6. Operación de instalación de una cubierta exterior para el edificio dañado del reactor número 1 (adaptada de Tepco).

más de medio kilómetro cuadrado dentro del emplazamiento.

- La retirada de grandes cantidades de escombros que se encontraban dispersos por todo el emplazamiento tras el tsunami, dificultando el movimiento de vehículos y personas, y que debido al grado de contaminación adquirida tras las explosiones, ha debido realizarse empleando maquinaria pesada operada remotamente. Los residuos generados sean almacenados en el propio emplazamiento, donde se han debido instalar almacenes adecuados a tal fin.
- La demolición, retirada y gestión adecuada de escombros de los edificios de las propias centrales dañadas, mediante grandes grúas y maquinaria pesada operada remotamente, dado el ambiente tan hostil desde el punto de vista radiológico en el que estas operaciones han debido desarrollarse, destacando la labor realizada ya en el edificio del reactor número 3 (Figura 5), y la iniciada en el del reactor número 4.
- La instalación de cobertura para los edificios, a fin de controlar posibles escapes de radiactividad, ya concluida en el caso del reactor número 1 (Figura 6). Esta ha sido una obra impresionante, implicando la construcción de estructuras metálicas gigantescas cuyo montaje se probó fuera del emplazamiento, para asegurar que la labor final de instalación se desarrollase sin fallos. Tras ello, el reactor ha quedado cubierto, con ventilación controlada, haciendo posible el desarrollo de nuevos trabajos en su interior.

- El refuerzo de estructuras dañadas, destacando de forma paradigmática la instalación realizada en la base de la piscina de combustible del reactor número 4. Para ello hubo de retirarse una gran cantidad de escombros, instalar pilares de acero y encofrados bajo la piscina, para el posterior hormigonado de refuerzo, que quedó concluido a finales de julio.

De cara a poder iniciar la retirada del combustible de las piscinas, las tareas previstas que deben abordarse a continuación son las siguientes, con mayor complejidad en los reactores 3 y 4, dado el gran deterioro que presentan sus edificios:

1. Descontaminación de la parte superior del edificio del reactor, previa cobertura de las piscinas.
2. Instalación de cubierta y equipos de manejo de combustible.

3. Fabricación de los contenedores de almacenamiento / transporte del combustible. Cápsulas para combustible dañado.
4. Reorganizar la piscina, remodelar los equipos de inspección, etc.
5. Retirar el combustible.

Del mismo modo, se ha previsto la siguiente serie de etapas hasta poder proceder a la retirada del combustible dañado y del *corium* de los reactores:

1. Descontaminación del edificio del reactor.
2. Búsqueda de fugas de agua en las zonas inferiores de la vasija del pozo seco (contención) y del edificio del reactor.
3. Reparación de las fugas.
4. Llenado con agua de la parte inferior del pozo seco, a fin de proporcionar el blindaje frente a la radiación que permita trabajar en la parte alta.
5. Inspección y toma de muestras del pozo seco.
6. Reparación de la parte superior del pozo seco.

7. Rellenado del pozo seco con agua, por los mismos motivos de blindaje, y apertura de la tapa superior del pozo seco.

8. Inspección de la vasija del reactor. Toma de muestras.

9. Retirada del combustible y *corium*. Encapsulado y paso a contenedores de transporte / almacenamiento.

Si bien la experiencia del desmantelamiento de la central de TMI-2 ha de resultar muy útil a la hora de diseñar cada operación en detalle, no cabe duda de que para su puesta en práctica será imprescindible desarrollar tecnología avanzada de manipulación remota adaptada a cada una de las operaciones necesarias.

CONCLUSIONES

Gracias a los medios humanos y materiales puestos en marcha inmediatamente tras el accidente, las primeras fases del Plan se han desarrollado en los plazos previstos, logrando refrigerar los reactores y piscinas, controlar y reducir el agua contaminada

acumulada, limpiar de escombros el emplazamiento, y atajar los escapes tanto atmosféricos como por vía líquida al mar.

Dentro de la estabilidad lograda, sigue habiendo cierta precariedad, ya que las contenciones de los reactores presentan fugas y pequeños escapes. La preocupación mayor es la posibilidad de pérdida de funciones en caso de nuevos desastres naturales. Sin embargo hay que reconocer que la situación de la central ha mejorado muchísimo con respecto al estado inicial inmediatamente después del accidente.

Hay que destacar que el plan de actuación es muy coherente y sin precedentes, y que para su aplicación necesitará de importantes programas de I+D de apoyo. No obstante, las elevadas incertidumbres que aun existen sobre el estado real de los reactores pueden alterar los plazos de consecución de los distintos hitos marcados, por lo que los plazos de desmantelamiento solo pueden ser aproximados.■

