

Inyección de cinc en las plantas de ANAV. Impacto sobre el combustible y experiencia de operación

N. Doncel y J.L. Gago

La inyección de cinc realizada en las tres centrales de ANAV (Asociación Nuclear Ascó-Vandellòs) es parte de un programa global de control de química, gestión de materiales y reducción de dosis. Los beneficios de la inyección de cinc son significativos en reducción de campos de radiación así como en mitigación de iniciación de las grietas en componentes (PWSCC). Aunque también reduce las tasas de corrosión general en el primario y por lo tanto el transporte de productos de corrosión al combustible, es necesario valorar si puede haber riesgo en el comportamiento del combustible. ANAV y Enusa, siguiendo las prácticas de la industria, han coordinado las tareas de viabilidad de este programa en Ascó y Vandellòs incluyendo monitorización de parámetros, inspecciones y control. Finalmente, este artículo describe una exhaustiva revisión de la experiencia operativa y los efectos en el combustible.

Zinc injection performed in the three ANAV (Asociación Nuclear Ascó-Vandellòs) plants is part of an overall primary water chemistry program, material management and dose reduction program. The application of zinc shows significant benefits in radiation field reduction as well as in mitigation of PWSCC initiation. Although zinc injection also reduces general corrosion rates and consequently reduces corrosion product transport to the fuel, an evaluation of the risks with respect to fuel performance should be done. ANAV and ENUSA, following industry recommendations, have coordinated the task related to the viability of the program in Ascó and Vandellòs including monitoring, inspections and control of parameters. Finally, this article includes a comprehensive review of operating experience and an assessment of fuel performance effects.

INTRODUCCIÓN

La “inyección de cinc” consiste en añadir directamente en el refrigerante del reactor pequeñas cantidades de un compuesto de cinc, comúnmente acetato de cinc. Esta inyección se realiza constantemente durante la operación del reactor utilizando un dosificador que mantiene una concentración objetivo de cinc en el primario. El cinc comenzó inyectándose en los reactores BWR y en los últimos 15 años se ha empezado a incorporar también en los PWR. Los objetivos que persiguen las centrales con la inyección de cinc son: reducir las dosis en parada, proteger los materiales del primario de los problemas de corrosión bajo tensión (PWSCC) y, a largo plazo, una reducción de la corrosión de los materiales del primario y por tanto de la liberación de los productos asociados a la misma.

En reactores PWR existe una amplia experiencia en plantas america-

nas [1,2], alemanas y también españolas. En concreto, las tres centrales de ANAV, CN Vandellòs II, CN Ascó I y CN Ascó II, llevan ya más de seis ciclos de operación con inyección de cinc con el objetivo de proteger los materiales del primario de corrosión bajo tensión.

Aunque la inyección de cinc es beneficiosa a largo plazo para los objetivos perseguidos, requiere precauciones durante los primeros ciclos por su posible impacto en la fiabilidad del combustible. En esos primeros ciclos se produce un aumento de la liberación de productos de corrosión al primario debido a la incorporación del cinc en las superficies.

Esta situación provoca un incremento de los depósitos de productos de corrosión (*crud*) en el combustible, lo que podría aumentar la posibilidad de aparición del fenómeno de anomalía axial de potencia. Con el nombre de anomalía axial de potencia *Axial*



NURIA DONCEL

Ingeniero de Tecnología de Combustible en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A.

Licenciada en Ciencias Químicas y Master en Energía Nuclear por la Universidad Autónoma de Madrid (UAM).



JOSE LUIS GAGO

Ingeniero de Diseño Nuclear en el Departamento de Combustible Nuclear.

ASOCIACIÓN NUCLEAR ASCÓ - VANDELLÓS II

Ingeniero industrial especialidad eléctrica y diplomado en estudios avanzados (DEA) en ingeniería nuclear por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Offset Anomaly (AOA) o *Crud Induced Power Shift* (CIPS) se describe el fenómeno de asimetría no esperada en la forma axial de potencia del combustible observado en algunos reactores de agua a presión (PWR). Este fenómeno, que se detecta originalmente en plantas americanas de cuatro lazos a finales de la década de los 90, se relaciona con la precipitación del boro en la superficie del combustible en presencia de una película de depósitos de productos de corrosión, en condiciones de ebullición subenfriada y con determinada química en el primario.

Enusa realiza, en coordinación con ANAV, el seguimiento específico de la inyección de cinc y las recomendaciones necesarias para realizar la inyección de cinc en con-

diciones de mínimo impacto para el combustible.

Además se ha realizado junto con EPRI un programa de demostración en CN Vandellòs II para estudiar el impacto del cinc en el combustible en una central PWR con condiciones de operación envolventes, y que ha incluido medidas de corrosión de vaina y análisis químico de los productos de corrosión. También se ha estudiado el efecto del cinc sobre el combustible en autoclave utilizando el experimento que Enusa y las centrales PWR desarrollaron durante años en Studsvik [3].

Los resultados de todos estos programas proporcionan datos que permiten evaluar el impacto sobre el combustible con el objetivo de poder garantizar el correcto comportamiento del mismo.

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE INYECCIÓN DE CINCO Y DEFINICIÓN DEL PLAN DE VIGILANCIA

Ascó I y II y Vandellòs II son PWR Westinghouse con tres lazos y 157 elementos de combustible MAEF (diseño de Enusa [4]) y vaina de Zirlo. La potencia nuclear térmica es de 2.940,6 MW y la química del refrigerante primario mantiene un pH coordinado con una máxima concentración de litio de 3,5 ppm. Vandellòs II tiene generadores de vapor con tubos de aleación 600TT mientras que Ascó I y II, después del reemplazo de generadores de vapor, utiliza tubos de aleación 800.

Enusa como proveedor de combustible trabaja con ANAV para garantizar la fiabilidad de combustible durante la adición de cinc. Esto incluye evaluación detallada del riesgo de AOA/CIPS para determinar la mejor estrategia de inyección de cinc, incluyendo el momento de la inyección durante el ciclo y los niveles de concentración de cinc, y la necesidad de realizar limpieza por ultrasonidos del combustible.

En todos los ciclos se realizó un análisis con el código BOA [5] para minimizar los riesgos según se ilustra en la Figura 1.

Además, se ha implementado un plan de vigilancia para controlar el impacto de la química de cinc en el combustible que consiste en la monitorización de las trazas axiales de elementos combustibles instrumentados y de la química del refrigerante primario para evaluar la posible acumulación de impurezas que podrían dar lugar a fenómenos como la AOA.

Se realizaron inspecciones de combustible en CN Vandellòs II dentro de un programa internacional con EPRI para garantizar que los márgenes de corrosión no han disminuido como resultado de la inyección de cinc. La selección de esta planta como referente está basada en el material de los tubos de los generadores de vapor y la calidad de los datos de muestreo de productos de corrosión en línea [6, 7]. No obstante, también se tomaron medidas de espesor de óxido adicionales en CN Ascó II para confirmar el efecto neutro de la adición de cinc sobre la corrosión del combustible.

Aunque no ha habido experiencia previa de AOA en ninguna de las plantas de ANAV, debido a la potencial mejora que supone por la eliminación de depósitos en el combustible, se aplica limpieza por ultrasonidos (*Ultrasonic Fuel Cleaning*, UFC) después de los ciclos de inyec-

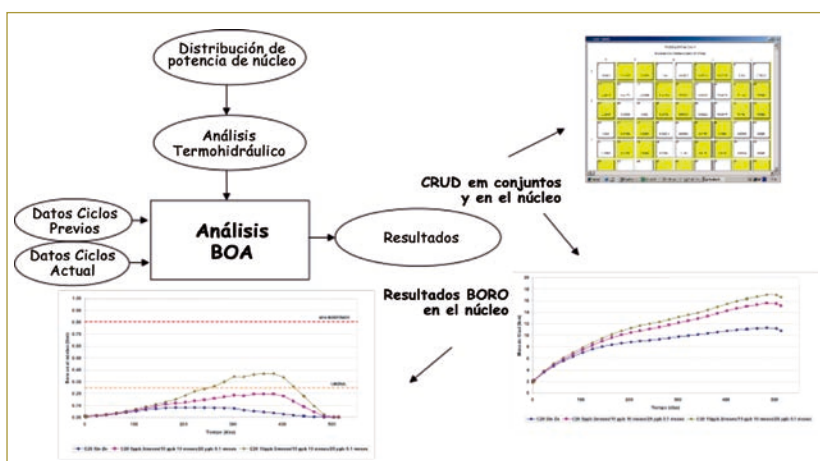


Figura 1. Esquema de trabajo de evaluaciones de viabilidad con el código BOA.

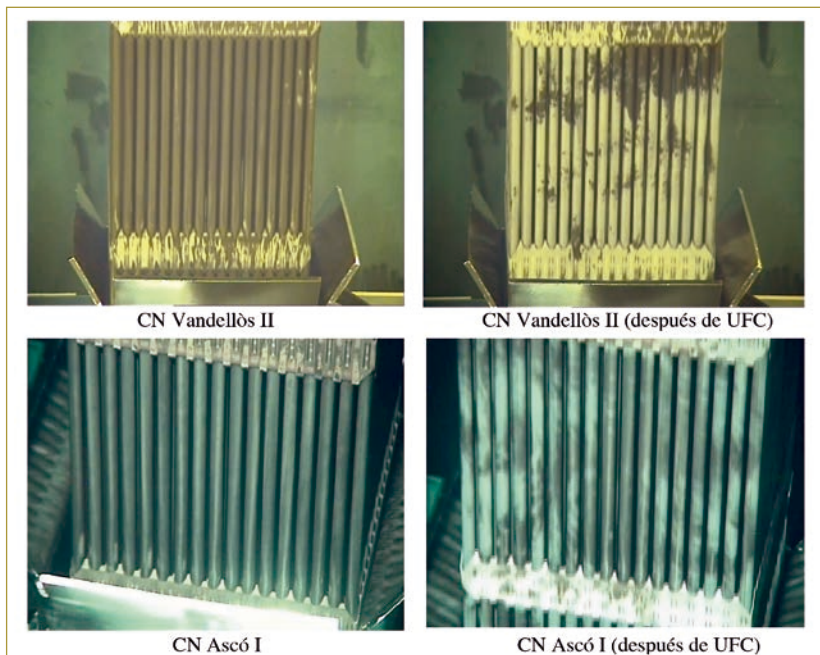


Figura 2. Imagen visual de elementos de Vandellòs II y de Ascó II antes y después de UFC.

ción de cinc en CN Vandellòs II y en ambas unidades de Ascó.

La Figura 2 muestra la apariencia visual de los elementos combustibles en CN Vandellòs II y de CN Ascó II antes y después de UFC. Después de la adición de cinc los conjuntos de combustible estaban cubiertos por una capa de impurezas, con un aspecto de menor espesor aparente en las dos unidades de Ascó que en Vandellòs II.

EXPERIENCIA DE INYECCIÓN DE CINCO EN ANAV

La inyección de cinc en Vandellòs II se inició en el ciclo de 15 a mitad de ciclo y desde el ciclo 16, todos los ciclos han incluido inyección de cinc desde el inicio de los mismos. Ambas unidades de Ascó también han completado seis ciclos de aplicación de cinc en el refrigerante primario comenzando en la mitad del primer ciclo.

En todos los casos, se ha seguido la estrategia de inyección de cinc que predice un riesgo menor para el combustible. Las concentraciones objetivo de cinc y la acumulación de cinc se resumen en la Tabla 1.

En todos estos ciclos se ha venido realizado un programa específico de seguimiento de los parámetros químicos y radio-químicos sin observar se indicios adversos.

La razón del seguimiento de estos productos de corrosión, particularmente de los radiocobaltos, durante los ciclos de inyección se debe a que el intercambio de los metales con el cinc podría conducir a una mayor deposición en el núcleo.

La Figura 3 presenta las medidas de ⁵⁸Co realizadas en las tres unidades incluyendo ciclos sin y con inyección de cinc. La Figura 4 recoge la información de medidas de concentraciones de cinc en el refrigerante.

Como era de esperar los radiocobaltos aumentaron con la inyección de cinc durante los ciclos como resultado de la adición de cinc.

También se conocían experiencias alemanas en PWR (aleación 800 en tubos de generador de vapor) que mostraron un aumento en los niveles de hierro después del inicio de la inyección de cinc. Sin embargo, no se ha observado esta circunstancia en los reactores de Ascó.

PLAN DE VIGILANCIA DEL COMBUSTIBLE

El plan de vigilancia también incluye revisión detallada de la tendencia de Axial Offset siguiendo la potencia

CN Vandellòs II	15	16	17	18	19	20
Estrategia, ppb	0-5-10	5-10-15	6-10-15	10-15	10-20	15-20
Exposición media (ppb-mes)	58	160	215	206	187	-
Zn inyectado	2.46	3.67	3.525	3.10	3.042	-
Zn pegado (kg)	1.94	1.40	0.795	0.885	0.740	-

CN Ascó I	19	20	21	22	23	24
Estrategia, ppb	0-5-10	5-10-20	10-20	10-20	20	20
Exposición media (ppb-mes)	56	190	234	248	290	-
Zn inyectado	2.81	3.68	4.54	4.59	6.09	-
Zn pegado (kg)	2.04	1.27	2.62	1.53	2.33	-

CN Ascó II	17	18	19	20	21	22	23
Estrategia, ppb	0-5-10	5-10-20	10-20	10-20	20	20	20
Exposición media (ppb-mes)	64	219	195	283	265	304	-
Zn inyectado	-	4.70	4.75	5.19	4.52	4.75	-
Zn pegado (kg)	-	1.50	2.05	1.00	1.12	2.61	-

Tabla 1. Programa de inyección de cinc en ANAV.

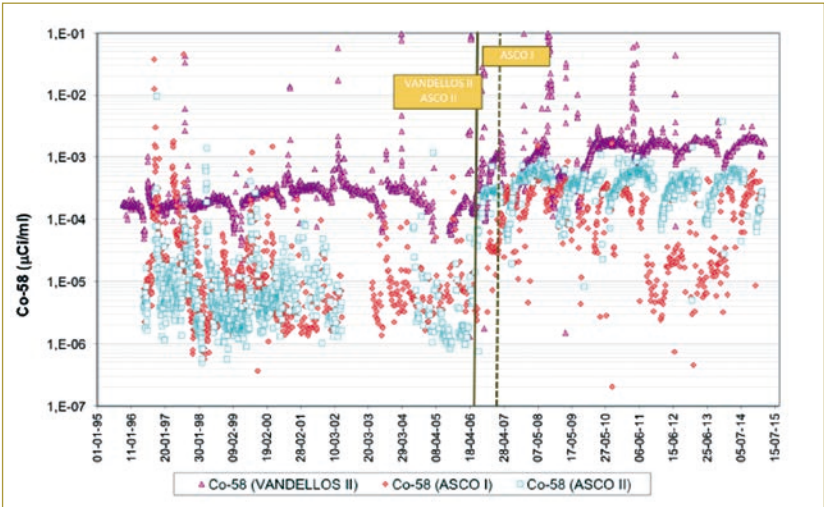


Figura 3: Medidas de ⁵⁸Co.

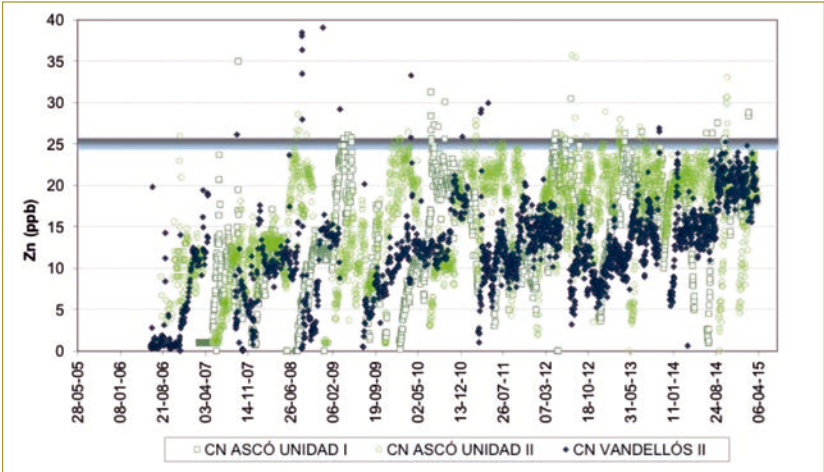


Figura 4: Medidas de concentración de cinc.

axial en un número determinado de elementos combustibles instrumentados. Esto nos da información que permite monitorizar cualquier posible deposición (*crud*) con retención de

boro lo que podría señalar el inicio de CIPS. No se ha detectado este fenómeno ni globalmente ni localmente en CN Vandellòs II ni en CN Ascó I/II en estos ciclos.

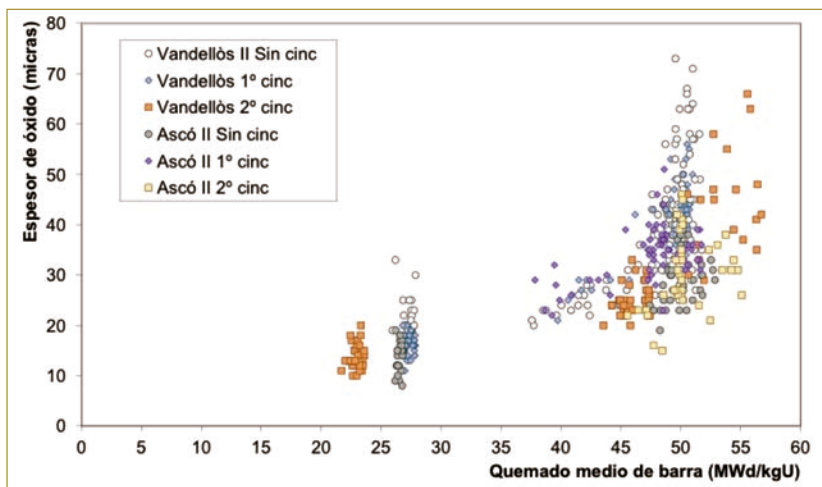


Figura 5: Máximos espesores de óxido medidos en CN Vandellòs II y CN Ascó II.

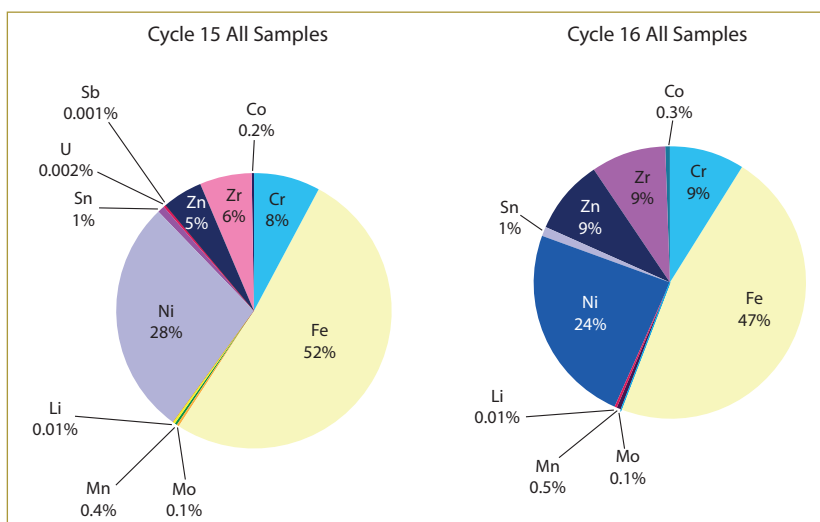


Figura 6: Resultados de las campañas de crud en ciclos 15 y 16 de CN Vandellòs II.

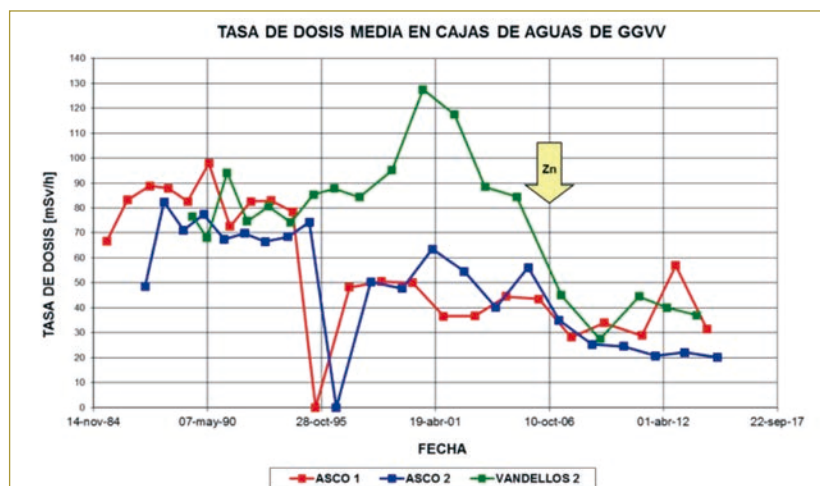


Figura 7: Evolución de las tasas de dosis en las cajas de aguas de los generadores de vapor de las tres plantas.

Dentro de los planes de seguimiento habituales realizados por las plantas y Enusa se dedicaron varias campañas específicas a medidas de corrosión después de los primeros ciclos de inyección de cinc en CN Vandellòs II y CN Ascó II.

En CN Vandellòs II se realizaron medidas de corrosión de vaina en elementos quemados una, dos y tres veces al final de los ciclos 14 (sin cinc), 15 y 16. El espesor máximo medido fue de 73 micras, obtenido sin inyección de cinc, y 66 micras después de un ciclo y medio de inyección de cinc.

Después del ciclo 17 en Ascó II se realizaron también medidas de corrosión para evaluar el efecto del cinc en la apariencia de combustible y el espesor de óxido. Se seleccionaron tres conjuntos combustibles irradiados durante 2 ciclos y se compararon con datos obtenidos al final del ciclo de 16 sin inyección de cinc. El espesor máximo medido de óxido fue de 51 micras.

La Figura 5 muestra el espesor máximo de óxido medido para cada barra inspeccionada. Al comparar las medidas de máximos espesores de óxido con las realizadas en ciclos anteriores a la inyección de cinc no se observaron diferencias significativas. Con ello se comprueba que no existe incremento de la corrosión de vaina por efecto de la inyección de cinc.

Al final de los ciclos 15 y 16 se hicieron, después de UFC, extracción de depósitos (*crud*) directamente de la superficie de la vaina con un sistema de *crud scraping*. El objetivo de estos análisis fue evaluar los cambios que el cinc podría tener en la masa, la morfología, composición y densidad de los depósitos.

La Figura 6 muestra un resumen de la composición de las medidas realizadas en CN Vandellòs II. Este "crud de cinc" es una mezcla de ferritas y cromitas con un porcentaje de cinc de aproximadamente el 5 % después del ciclo de 15 y alrededor del 9 % después del ciclo 16.

Este "crud de cinc" formado en la superficie de la vaina no afecta al rendimiento del combustible, aunque el porcentaje de cinc se ha incrementado con la exposición a la concentración de cinc. Los resultados de estas muestras se consideran comparables con la experiencia de la industria.

REDUCCIÓN EN LOS CAMPOS DE RADIACIÓN

Los efectos positivos después de la adición de cinc se observaron en las tasas de dosis medidas con evoluciones similares a otras plantas. La Figu-

ra 7 muestra la reducción de las tasas de dosis en los generadores de vapor, medidas al final de los ciclos con inyección de cinc, confirmando el efecto del cinc en la reducción de los campos de radiación.

CONCLUSIONES

Desde ANAV y Enusa estamos convencidos de que las evaluaciones de viabilidad realizadas con el código BOA junto con los programas de vigilancia de química, radioquímica y trazas axiales y las inspecciones de combustible han sido claves para consolidar una situación estable y con mínimo riesgo en la implementación del programa de inyección de cinc.

Las inspecciones de corrosión tanto en CN Ascó II como en CN Vandellòs II tras los primeros ciclos de la adición de cinc indican que no hay efecto del cinc en el comportamiento de la barra de combustible de Zirlo para las concentraciones de cinc aplicadas.

Las propiedades de los depósitos (*crud*) de CN Vandellòs II después de los dos primeros ciclos de inyección de cinc no parecen haberse visto afectadas y están de acuerdo con las observaciones típicas de la industria.

La inyección de zinc se ha demostrado altamente efectiva en la reducción de tasas de dosis en el primario en las tres unidades de ANAV. Se han conseguido reducciones del orden del 40 % al 60 % respecto a los valores medidos previos a la inyección de zinc.

La perspectiva a futuro está centrada en disponer de una herramienta mejorada en la nueva versión del código BOA (4.0) actualmente en desarrollo en EPRI. Esta versión cuenta con un modelo de deposición de cinc basado en las medidas y la experiencia de Vandellòs. Por tanto, tanto ANAV como Enusa continuaremos trabajando para mejorar la comprensión del papel de la inyección de cinc y de los procesos de química del primario en la fiabilidad del combustible y en la gestión de materiales del primario.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pressurized Water Reactor Primary Water Zinc Application Guidelines. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. 1013420
2. Evaluation of Fuel Cladding Corrosion and Corrosion Product Deposits from Callaway Cycle 14: Results of Poolside Examinations Following Two Cycles

of Zinc Addition. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. 1013425

3. Investigación sobre el mecanismo de formación de depósitos en la barra combustible. Artículo de la revista de la SNE de Mayo 2012.
4. Evolución del combustible PWR suministrado por ENUSA. Ponencia realizada en 34ª Reunión Anual Sociedad Nuclear Española Murcia, 29-31 de octubre de 2008
5. Desarrollo y Aplicaciones del código BOA en España. Ponencia realizada en 38ª Reunión Anual Sociedad Nuclear Española Cáceres, 17-19 de octubre de 2012
6. Evaluation of Fuel Cladding Corrosion and Corrosion Product Deposits from Vandellòs II Cycle 15: Interim Report Following First Cycle of Zinc Addition. EPRI, Palo Alto, CA; ANAV, Spain; Comunidad de Bienes de Central Nuclear de Almaraz, Spain and ENUSA, Spain: 2008. 1016615
7. Evaluation of Fuel Cladding Corrosion and Corrosion Product Deposits from Vandellòs II Cycle 16: Final Report after Second Cycle of Zinc Addition. EPRI, Palo Alto, CA; ANAV, Spain; Comunidad de Bienes de Central Nuclear de Almaraz, Spain and ENUSA, Spain: 2010. 1021037.■