

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD DE COMBUSTIBLE GASTADO EN REINUNDACIÓN



FRANCISCO FERIA MÁRQUEZ

Investigador senior en Unidad de Seguridad Nuclear.
División de Fisión. Departamento de Energía
CIEMAT



LUIS E. HERRANZ PUEBLA

Responsable de Unidad de Seguridad Nuclear.
División de Fisión. Departamento de Energía
CIEMAT

1. INTRODUCCIÓN

Una condición indispensable en seguridad nuclear es preservar la integridad de vaina de la barra de combustible. El estado termo-mecánico del combustible durante su gestión tras la irradiación en el reactor es determinante de dicha integridad. Algunos procesos, como el secado de combustible preparatorio para su almacenamiento en seco y/o su reinundación en caso de ser necesaria su devolución a la piscina tras dicho almacenamiento, suponen condiciones singulares en las cuales la integridad de la vaina podría verse comprometida. En concreto, las condiciones de secado pueden favorecer la fragilización del material por reorientación radial de los hidruros formados, lo cual reduciría notablemente la resistencia a fallo por choque térmico durante la reinundación.

Dada la importancia de caracterizar adecuadamente la reorientación radial de hidruros en almacenamiento en seco por su potencial efecto en la integridad de vaina, tanto dicho mecanismo como sus consecuencias se convirtieron en motivo de experimentación y modelado (Desquines et al., 2014; Billone et al., 2013; Billone et al., 2015; Desquines et al., 2015; Wang and Wang, 2017; Larson, 2018; Feria et al., 2020). Resultados de dichos estudios indican que la reorientación radial de hidruros puede aumentar la temperatura de transición dúctil-frágil a más de 100 °C (Billone et al., 2013; Billone et al., 2015), dependiendo del tipo de aleación de circonio, con las implicaciones que ello tendría en la gestión del combustible almacenado en seco en el largo plazo o en acciones de manejo o transporte. En el caso particular del escenario de reinundación, en la actualidad

hay carencia de datos experimentales que permitan evaluar adecuadamente la seguridad del combustible ante dichas condiciones.

En este contexto, este trabajo muestra la metodología desarrollada por CIEMAT como soporte a CNAT (Centrales Nucleares Almaraz-Trillo) en el análisis de integridad de vaina de combustible irradiado gestionado en seco. En particular, se analiza dicha integridad bajo condiciones de reinundación tras el proceso de secado, para lo cual previamente se analiza la ductilidad remanente de vaina. Las herramientas analíticas empleadas han sido FRAPCON-xt, para la caracterización de la ductilidad de vaina previa a reinundación, y FRAPTRAN, para evaluar la integridad del material en el propio transitorio de reinundación. Esta metodología cubre las necesidades termo-mecánicas existentes tras los análisis termohidráulicos realizados hasta el momento.

2. METODOLOGÍA

2.1. FRAPCON-xt

La herramienta analítica empleada para caracterizar la vaina durante secado y almacenamiento a partir del estado tensional soportado por ésta ha sido FRAPCON-xt (Feria et al., 2015; Feria y Herranz, 2017); se trata de una extensión a almacenamiento en seco del código termo-mecánico de estado estacionario FRAPCON, desarrollado por PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) para el organismo regulador americano, NRC (Geelhood et al., 2015).

FRAPCON presenta tres módulos fenomenológicos acoplados: térmico, mecánico y liberación de gases de fisión

(LGF). Los módulos en los que el código da opciones son el mecánico y el LGF, en los que se ha elegido la opción recomendada por los desarrolladores del código (Geelhood y Luscher, 2015). En concreto, en el módulo mecánico se ha elegido la opción de cálculo analítico clásico (FRACAS-I). En el caso de LGF se ha seleccionado el modelo MASSIH, basado en las ecuaciones de Forsberg-Massih. En cuanto al módulo térmico los cálculos se realizan mediante ecuaciones clásicas de conservación de energía y transferencia de calor.

La variable objetivo en los cálculos realizados ha sido la tensión circunferencial de la vaina, dada la importancia del estado tensional en la reorientación radial de hidruros (i.e., fragilización del material).

2.2. FRAPTRAN

El código termo-mecánico utilizado para analizar el transitorio de reinundación ha sido FRAPTRAN (Geelhood et al., 2016). Al igual que FRAPCON, es un código desarrollado por PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) para el organismo regulador americano, NRC.

Las estimaciones del código se han empleado para determinar la tensión axial como consecuencia del choque térmico a medida que el frente de agua avanza axialmente a lo largo de la barra de combustible.

Dado que FRAPTRAN no calcula la interacción entre nodos axiales de vaina, la tensión axial por choque térmico, σ_z , se ha determinado considerando la tensión que ejerce el nodo frío por contracción térmica (zona axial cubierta por el agua) sobre el nodo caliente inmediatamente superior. Para ello se

ha aplicado la ecuación clásica empleada en el régimen de deformación elástica:

$$\sigma_z = E \cdot \epsilon_z \quad (1)$$

donde la deformación axial por contracción térmica, ϵ_z , y el módulo de Young, E , se estima con el código FRAPTRAN a partir de condiciones termohidráulicas impuestas (la deformación axial σ_z incluye efecto térmico y mecánico). Cabe notar que en los cálculos FRAPTRAN no hay conducción axial en vaina, lo cual le da conservadurismo a la estimación de tensión axial citada.

2.3. Criterios

En la metodología de este trabajo se han empleado diferentes criterios para evaluar la integridad de vaina. En el criterio aplicado para la caracterización del material de vaina previa a la reinundación se considera que si la tensión circunferencial en vaina, σ_θ , supera el umbral de 90 MPa, los hidruros reorientados radialmente son suficientes como para fragilizarla.

En cuanto al criterio de fallo en reinundación se asume que el choque térmico puede producir el fallo de vaina o bien si la tensión axial supera una tensión umbral, σ_{lim} (i.e., se emplea la tensión límite del régimen elástico, estimada por FRAPTRAN), o bien si debido a la reorientación radial de hidruros se produjera la transición dúctil-frágil de la vaina (aplicación de criterio de tensión superior a 90 MPa, comentado anteriormente), de manera que cualquier tensión podría provocar fallo.

Nótese que los criterios aplicados son conservadores y que la reducción de dicho conservadurismo implicaría enfocar el estudio en la determinación del efecto de la concentración de hidruros reorientados radialmente. En la Figura 1 se muestra un esquema de los criterios aplicados.

3. APLICACIÓN

3.1. Escenario

Irradiación

La barra de combustible objeto de estudio se corresponde con un elemento de combustible 17x17 para reactor tipo PWR diseñado por Westinghouse. El material de vaina es ZIRLO. La historia de potencia empleada ha sido una envolvente asociada a estudios de diseño de la barra, la cual se representa en la Figura 2 en términos de potencia lineal promedio, q' , en función del tiempo. El quemado alcanzado a final de vida es de 62 GWd/tU. La Figura 2 también muestra el perfil axial de potencia simulado. En cuanto a las condiciones de contorno consideradas durante el alma-

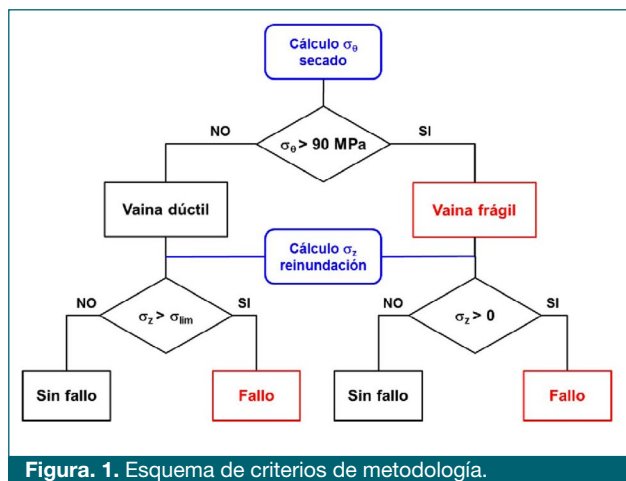


Figura 1. Esquema de criterios de metodología.

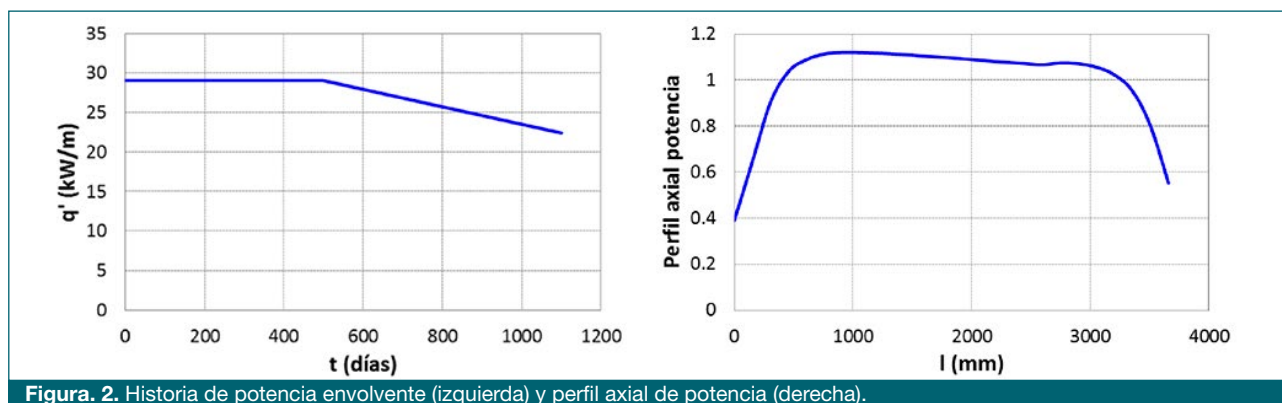


Figura 2. Historia de potencia envolvente (izquierda) y perfil axial de potencia (derecha).

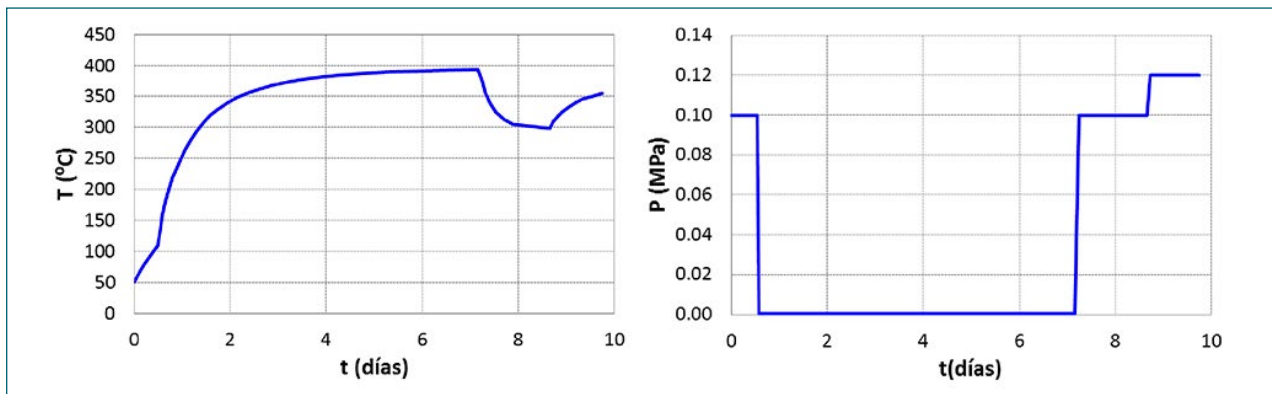


Figura 3. Temperatura máxima (izquierda) y presión externa (derecha) en secado.

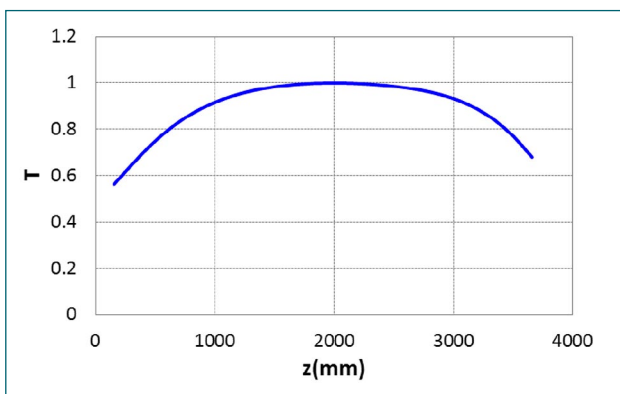


Figura 4. Perfil axial de temperatura en secado (normalizado).

cenamiento en piscina estas son 50°C de temperatura y 0.1 MPa de presión.

Secado

Las condiciones de contorno impuestas durante el secado se muestran en la Figura 3 (temperatura, T , y presión externa, P), donde la temperatura representada es la máxima alcanzada por la barra axialmente, z . En dicha fase se ha impuesto una potencia residual (0.00168 kW/m) y un perfil axial de temperatura (Figura 4).

Reinundación

Durante el periodo de reinundación se ha impuesto la misma potencia residual que durante el secado (0.00168 kW/m). En cuanto a las condiciones de temperatura (en 24 nodos axiales) y presión externa, han sido dadas por CNAT e impuestas a través del fichero de entrada de FRAPTRAN; dichas condiciones se muestran en la Figura 5.

3.2. Resultados

Irradiación

La Figura 6 muestra la presión interna de barra estimada durante la irradiación, como variable determinante para la tensión de vaina en secado (el espesor de óxido máximo calculado es de 52 μm y no tiene un efecto notable en la tensión). Además, en la Figura 6 también se incluyen aquellas variables que afectan a dicha presión interna (i.e., volumen libre de barra, gases de fisión liberados y temperatura de plenum, como volumen libre con mayor contribución en la presión interna).

De la Figura 6 se infiere que una contribución importante en la presión interna de barra a final de vida en reactor, y por tanto en la tensión en secado, es la liberación de gases de fisión, que empieza a tener efecto a partir de los 400 días de irradiación (anteriormente es la reducción de volumen libre la que aumenta ligeramente la presión). Esto es debido a que se aplica una historia de potencia conservadora, como se muestra en la sección 2.1.

Secado

La Figura 7 representa la tensión circunferencial de vaina máxima estimada durante el proceso de secado. Como se puede observar, la mejor estimación de la tensión no alcanza los 90 MPa impuestos como umbral (empleo de mejor estimación de acuerdo a USNRC (2003)). En otras palabras, desde el punto de vista del criterio mostrado en la sección 3.3, el material de vaina no se considera fragilizado por la reorientación radial de hidruros.

Reinundación

La Figura 8 muestra la tensión axial máxima en cada nodo como consecuencia del choque térmico cuando avanza el

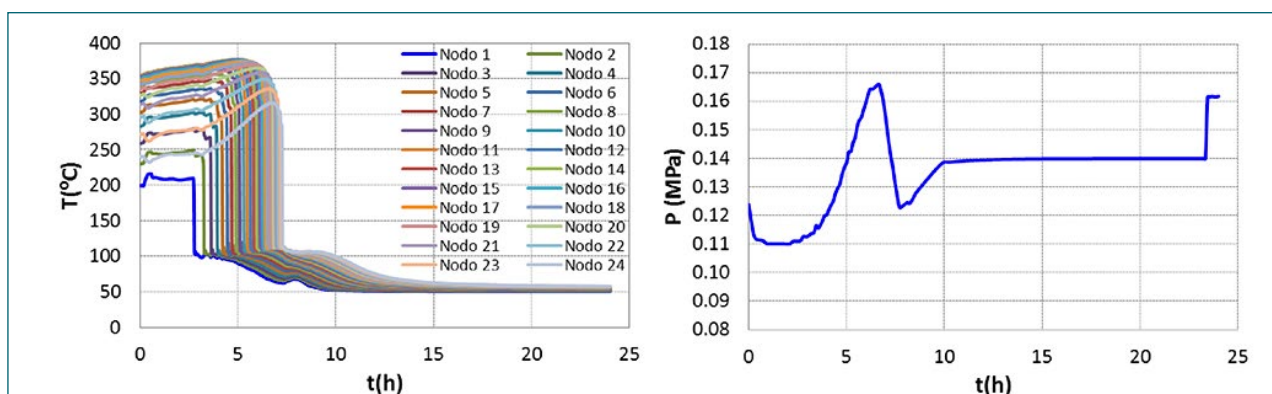


Figura 5. Temperatura (izquierda; representación de nodos axiales desde 1, inferior, hasta 24, superior) y presión externa (derecha) en reinundación.

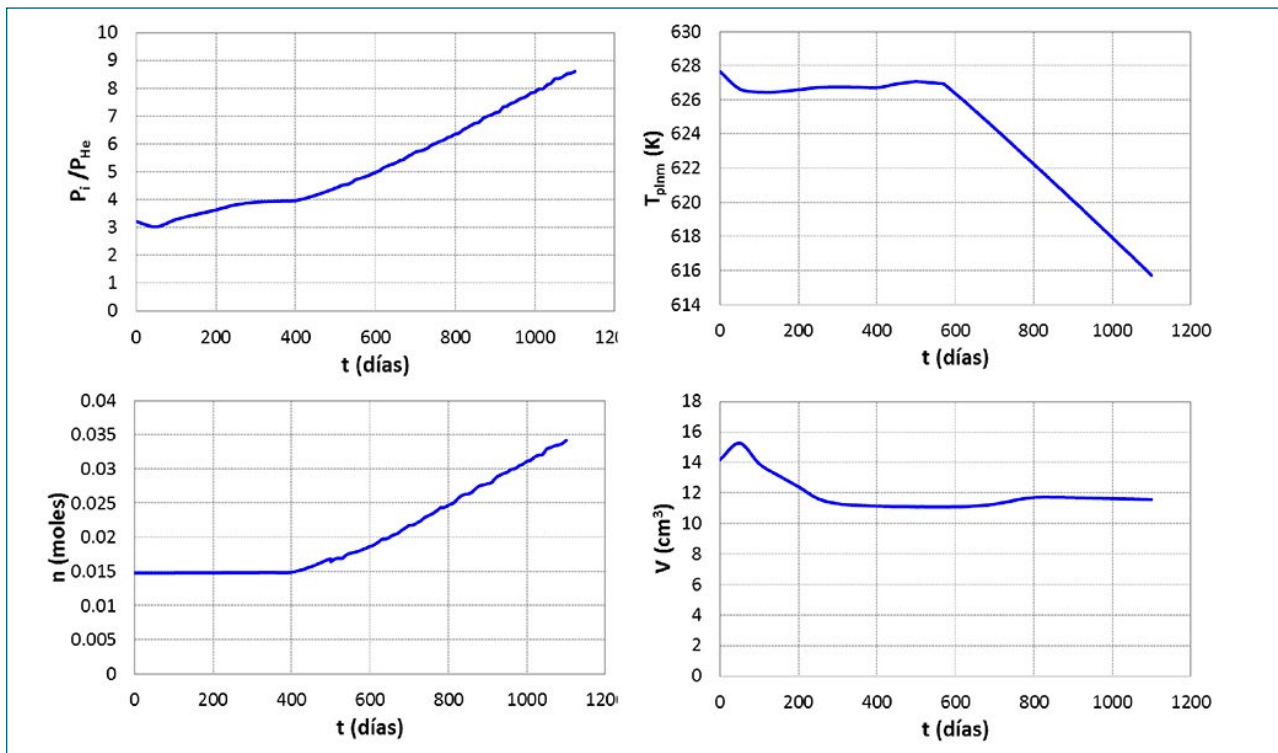


Figura 6. Evolución durante irradiación de presión interna de barra normalizada a la presión del llenado de He, P_i/P_{He} , temperatura de plenum, T_{plnm} , número de moles totales, n , y volumen libre de barra, V .

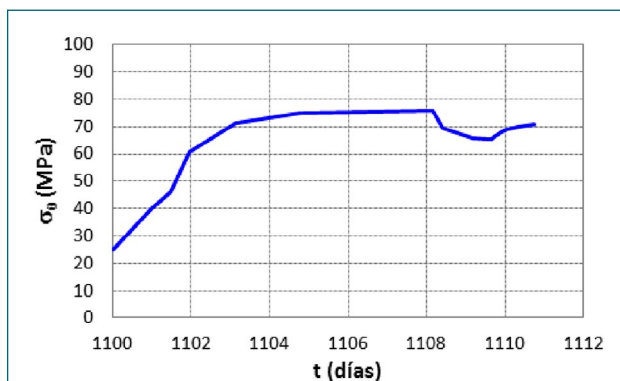


Figura 7. Evolución durante secado de tensión circunferencial máxima de vaina.

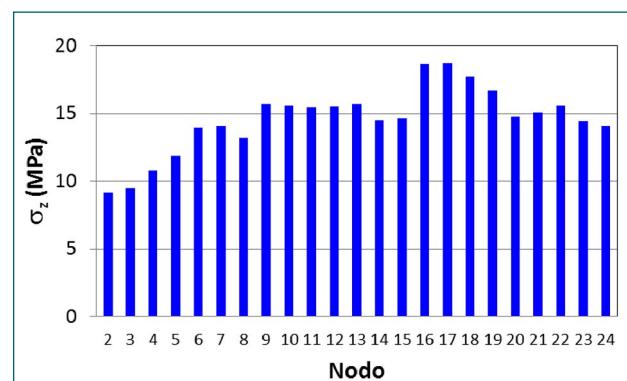


Figura 8. Tensión axial por choque térmico, σ_z , en cada nodo axial simulado.

frente de agua. Dado que la vaina se asume no fragilizada y de acuerdo al criterio mostrado en la sección 3.3, hay un amplio margen hasta la tensión límite mínima estimada por el código (550 MPa). Es decir, no habría fallo de vaina por choque térmico.

4. CONCLUSIONES

El trabajo llevado a cabo ha permitido aplicar una metodología de análisis termo-mecánico durante los procesos de secado y reinundación de una barra de combustible irradiada a alto quemado (62 GWd/tU). En concreto, se ha evaluado la ductilidad de vaina tras el secado y la integridad de esta en reinundación. Entre los aspectos que merecen ser destacados están: la utilización de una versión de FRAPCON específicamente extendida para tener en cuenta los procesos termo-mecánicos durante el almacenamiento en seco del combustible y la determinación de la tensión por choque térmico mediante estimaciones con FRAPTRAN.

Los resultados de mejor estimación obtenidos en secado han dado lugar a una tensión circunferencial máxima que no supera el umbral establecido de 90 MPa. De acuerdo a esto, no se considera fragilización de vaina por reorientación radial de hidruros, es decir, la vaina mantendría la ductilidad remanente ante acciones de manejo o transporte. En el caso de la reinundación, la tensión axial generada por choque térmico muestra un margen de seguridad amplio con respecto a la tensión límite estimada (valor mínimo de 550 MPa).

Cabe notar que los cálculos se han realizado de forma conservadora tanto en la historia de potencia aplicada, como en las condiciones de secado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a CNAT (Centrales Nucleares Almaraz-Trillo) por la financiación del trabajo y en particular a Jorge Benavides, Luis Rey y Roberto Plaza por las discusiones técnicas mantenidas.

REFERENCIAS

- Adamson, R. B., Rudling P., 2001. Mechanical Properties of Zirconium Alloys. IZNA-1 Special Topical Report.
- Billone, M.C., Burtseva, T.A., Einziger, R.E., 2013. Ductile-to-brittle transition temperature for high-burnup cladding alloys exposed to simulated drying-storage conditions. *Journal of Nuclear Materials* 433, 431-448.
- Billone, M.C., Burtseva, T.A., Martin-Rengel, M.A., 2015. Effects of lower drying-storage temperatures on the DBTT of high burnup PWR cladding. FCRD-UFD-2015-000008, ANL-15/21.
- Desquines, J., Drouan, D., Billone, M., Puls, M.P., March, P., Fourgeaud, S., Getrey, C., Elbaz, V., Philippe, M., 2014. Influence of temperature and hydrogen content on stress-induced radial hydride precipitation in Zircaloy-4 cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 453, 131-150.
- Desquines, J., Drouan, D., Philippe, M., 2015. A new model on radial hydride precipitation in Zircaloy-4 claddings under decaying stress and temperature transient. IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors - An Integrated Approach to the Back-End of the Fuel Cycle.
- Feria, F., Herranz, L.E., Penalva, J., 2015. On the way to enabling FRAPCON-3 to model spent fuel under dry storage conditions: The thermal evolution. *Annals of Nuclear Energy*, 85, 995-1002.
- Feria, F., Herranz, L.E., 2017. Análisis termo-mecánico de barra de combustible de C.N. Trillo en condiciones de secado y reinundación. CIEMAT, DFN/SN-07/OP-17.
- Feria, F., Herranz, L.E., 2018. Evaluación de integridad de vaina de barra almacenada en ATI de C.N. Trillo. CIEMAT, DFN/SN-02/OP-19.
- Feria, F., Aguado, C., Herranz, L.E., 2020. Extension of FRAPCON-xt to hydride radial reorientation in dry storage. *Annals of Nuclear Energy*, 145, 107559.
- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Raynaud, P.A., Porter, I.E., 2015. FRAPCON-4.0: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup. PNNL-19418, Vol.1 Rev.2.
- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Cuta, J.M., Porter, I.A., 2016. FRAPTRAN-2.0: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods. PNNL-19400, Vol.1 Rev2.
- Larson, N., 2018. U.S. DOE spent nuclear fuel storage & transportation R&D activities. ESCP spring meeting.
- USNRC, 2003. Spent Fuel Project Office, Interim Staff Guidance N° 11, Revision 3.
- Wang, J-A, Wang, H., 2017. Mechanical Fatigue Testing of High-Burnup Fuel for Transportation Applications. NU-REG/CR-7198, Rev. 1, ORNL/TM-2016/689. ■