

Investigación en el Ciemat sobre accidentes severos: estrategia y resultados recientes

L.E. Herranz

La investigación en accidente severo es un ingrediente indispensable en tecnología nuclear. Su complejidad supone desafíos de envergadura cuya superación exige la cooperación internacional. El Ciemat, con más de 40 años de experiencia acumulada en el campo, ha establecido una estrategia de investigación y ha desarrollado capacidades teórico-experimentales cuyos resultados más recientes se ilustran en este artículo. A través de ellos se identifican las numerosas áreas de actuación y se perfila el afán por el crecimiento continuo de conocimiento y capacidades.

Severe accident research is a fundamental brick in the nuclear technology wall. Its complexity entails huge challenges that require international cooperation to be overcome. CIEMAT has accumulated more than 40 years of experience in the field. By setting a structured research strategy and a continuous enhancement of theoretical and experimental capabilities, CIEMAT has recently produced the results on which this article builds up. Through them, both its working domains and its firm commitment for a continuous growth of knowledge and know-how are outlined.

INTRODUCCIÓN

El accidente ocurrido hace algo más de un año en la central nuclear de Fukushima-1 fue el “testimonio de lo improbable”, la realidad de un suceso remoto. Las unidades 1, 2 y 3 de la central sufrieron lo que se conoce como *accidente severo*.

Los accidentes severos son aquellos en los que se produce daño en el núcleo del reactor. Su consideración en la tecnología nuclear se remonta a la década de los 50 del pasado siglo. Uno de los estudios referentes en aquel tiempo fue el WASH-740 (Usaec, 1957), donde se postulaba el peor caso previsible para un reactor de 500 MWe y se calculaban sus consecuencias. Desde entonces, el avance en el conocimiento de tan singulares escenarios ha sido extraordinario. La vertebración en el tiempo de documentos emblemáticos como el TID-14844 (Usaec, 1959), el WASH-1400 (Usnrc, 1975), el Nureg-1150 (Usnrc, 1990) o el Nureg-1465 (Soffer *et al.*, 1995), permiten valorar dicho progreso a través de las metodologías utilizadas en sus predicciones: desde el empirismo a las simulaciones computacionales con modelos integrados. Posiblemente, el estudio que mejor represente el estado actual del conocimiento sea el de-

nominado *Soarca* (Chang *et al.*, 2012), que analiza las consecuencias de los accidentes severos en varias centrales americanas mediante algunos de los códigos de cálculo más avanzados. A pesar de esta evolución, la complejidad inherente de estos escenarios hace que, aún en la actualidad, el juicio de expertos sea un elemento indispensable en tales análisis.

Además de la atención prestada en las estimaciones del riesgo, la importancia de los accidentes severos queda patente tanto en su implicación en la *defensa en profundidad* (base fundamental de la seguridad nuclear) como en su influencia en los diseños de centrales nucleares. Los dos últimos niveles de la *defensa en profundidad* están dedicados, respectivamente, al control de las condiciones severas en planta y a la mitigación de sus consecuencias radiológicas más allá de la central. En ambos casos el procedimiento de actuación ha requerido la creación de guías de gestión de accidente severo, cuyo fundamento es, nuevamente, el conocimiento adquirido sobre tales escenarios. Los diseños de centrales no han sido ajenos al progreso en este área. La mayoría de las centrales de segunda generación han implantado y/o adaptado sistemas con el objetivo



LUIS E. HERRANZ PUEBLA

es doctor por la UPM (1996); dirige la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear del Ciemat, a la que pertenece desde 1987. Sus campos de actuación son accidente severo, termo-mecánica de combustible y sistemas nucleares innovadores.

específico de amortiguar los posibles efectos de estos accidentes; previsiblemente, este hecho será acentuado como resultado de las pruebas de resistencia y evaluaciones llevadas a cabo tras Fukushima. Los reactores de tercera generación incluyen características tecnológicas *ad-hoc* en su planteamiento. Finalmente, los sistemas innovadores de cuarta generación, actualmente en su fase de diseño conceptual, han dado un paso más allá, planteando la integración de los accidentes severos en su base de diseño.

En otras palabras, el origen de elementos determinantes del nivel actual de seguridad de las centrales nucleares, como las metodologías de estimación del riesgo, los códigos de cálculo, las guías de gestión de accidente severo, los sistemas de mitigación específicos y otros, no es otro que el conocimiento existente sobre fenomenología y evolución de accidentes severos. Es pertinente preguntarse cómo se ha logrado el saber en esta materia. La respuesta es directa: mediante la investigación. Más allá de la oportunidad que brinda el accidente de Fukushima, ojalá que el valor añadido por la investigación en accidente severo a la seguridad de las centrales nucleares, sea la motivación

raíz de este número monográfico de *Nuclear España*.

El presente artículo resume la estrategia y los principales resultados de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear del Ciemat en el ámbito de los accidentes severos. Previamente, es menester analizar las peculiaridades de la investigación en este área, de modo que implícitamente quede manifiesto el esfuerzo de la labor realizada. Los más de 25 años de historia desde el inicio de estas actividades en el Ciemat, unidos a la necesaria limitación de la extensión del artículo, imponen que el alcance del mismo se limite a las actividades en curso o finalizadas en un pasado reciente.

INVESTIGACIÓN EN ACCIDENTES SEVEROS

Características fundamentales

Los accidentes severos entrañan una enorme complejidad. Un análisis somero de sus características permite comprender el desafío que supone su investigación.

El término *accidente severo* agrupa, en realidad, a un conjunto numeroso y diverso de escenarios que dependen del tipo de reactor, de las especificidades de la propia planta y de la secuencia concreta que los originan. Los fenómenos que en ellos ocurren son de naturaleza diversa (i.e., química, termo-hidráulica, mecánica, etc.) y están íntimamente relacionados. Valga citar como ejemplo la oxidación de la vaina de combustible que, además de degradar las propiedades mecánicas del material, aportaría unos 10^6 J/kg al sistema y podría llegar a liberar cantidades de H_2 próximas a los 1000 kg; en otras palabras, afectaría a la termo-hidráulica, al transporte de productos de fisión y a la composición de la atmósfera en el recinto de contención. Más allá de los fenómenos, los rangos de variables características son amplios y extremos; ejemplos son: la temperatura, entre unos 100 °C y hasta 3000 °C; la presión, desde atmosférica a más de 100 bar; o la tasa de dosis, que oscilaría entre los 10^{-1} Gy·s⁻¹ en contención a los más de 10^3 Gy·s⁻¹ en las inmediaciones del reactor. Además, la concurrencia de muchos tipos de materiales de propiedades físico-químicas muy distintas (i.e., combustible, elementos de control, productos de fisión, etc.) complican la situación, dando lugar a formación de eutécticos, interacciones químicas, cambios de fase, etc. Así pues, se podría concebir el accidente severo como un enorme reactor químico cuyas condiciones son dinámicas en el tiempo y heterogéneas en el espacio. Más aún, muchos de los fenó-

menos son dependientes del tamaño del sistema, de modo que cualquier experimentación debe garantizar su representatividad mediante el escalado de la instalación.

El objetivo general de la investigación en accidente severo es lograr la comprensión de los fenómenos implicados y de sus interacciones. Solo desde ella es posible proponer medidas preventivas y/o mitigadoras o, si fuera el caso, confirmar la adecuada respuesta de los sistemas de seguridad ya existentes. El conocimiento adquirido se estructura en herramientas de simulación capaces de predecir con suficiente precisión los diversos aspectos involucrados en el accidente: degradación del núcleo del reactor, evolución termo-hidráulica de la central y liberación y transporte de productos de fisión. Para ello se establece una metodología donde actividades teóricas y experimentales se conectan íntimamente (Figura 1). Desde las bases teóricas fundamentales y/o los datos procedentes de ensayos específicos, se crean **modelos** y/o se derivan correlaciones empíricas que describen los fenómenos individuales de interés. Su conjunción y articulación con otros se lleva a cabo en **códigos de cálculo**, donde el elemento esencial es la correcta descripción de la relación entre fenómenos individuales. La adecuación de esta integración ha de verificarse mediante el contraste de las estimaciones del código con datos representativos (validación), habitualmente obtenidos en **experimentos integrales** que tratan de reproducir un accidente severo total o parcialmente. Estas comparaciones pueden revelar varios hechos: la bondad del código como herramienta de predicción, en cuyo caso la validación del código con otro experimento continúa hasta que se considere totalmente satisfactoria; la inadecuada formulación de fenóme-

nos considerados o su interrelación, lo que puede conducir a la proposición de mejoras en el modelo existente o en la interfase de modelos en el código y/o a la realización de nuevos experimentos a pequeña escala; o la inexistencia en el código de modelo alguno para fenómenos que aparecen en el escenario integral, lo que requerirá acudir a los fundamentos y/o a los ensayos específicos para desvelar las leyes que los rigen. Por último, cabe destacar la enorme dificultad y coste de los experimentos integrales, cuya necesidad se deriva de la escasez de accidentes reales en la historia de la tecnología nuclear. Desde esta última perspectiva, el accidente de Fukushima-1 supone una oportunidad.

Como consecuencia de los retos científicos y económicos que el estudio de los accidentes severos plantea, la cooperación internacional se ha erigido en un instrumento imprescindible y eficaz para su realización. Europa lidera actualmente este campo a través de la red europea de investigación en accidente severo (Sarnet).

Capacidades y estrategia del Ciemat

El Ciemat fundamenta su investigación en accidente severo en cuatro pilares fundamentales:

- La dualidad teórico-experimental como instrumento potenciador de la calidad.
- La integración internacional, particularmente en los marcos de la Unión Europea y la OECD-NEA.
- El equilibrio entre explotación de la experiencia e innovación, tanto en temas como en herramientas.
- La aplicación de resultados a estudios de seguridad, estableciendo un puente entre ciencia y tecnología nuclear.

Sobre ellos, se articulan las actividades donde el Ciemat tiene capacidad propia (color azul en la Figura 1):

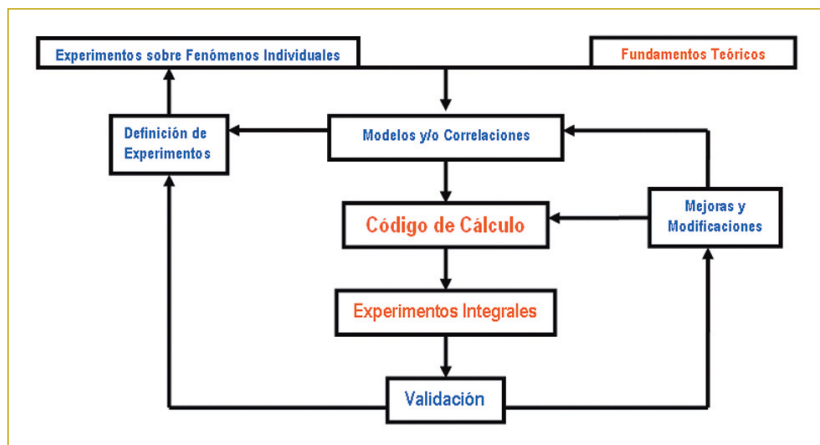


Figura 1. Estructura y elementos de investigación fundamental en accidente severo.



Figura 2. Imagen del LASS.

- Definición y realización de experimentos fenomenológicos.
- Desarrollo y mejora de modelos y/o correlaciones.
- Validación de códigos de cálculo.
- Interpretación de experimentos integrales.

La Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear dispone del Laboratorio de Análisis de Sistemas de Seguridad (LASS), donde lleva a cabo experimentos de distinta índole. Sus componentes esenciales son: una vasija de acero de 8,4 m³ capaz de soportar presiones superiores a 3 bar y 140 °C de temperatura; un sistema de suministro e inyección de gases de configuración variable; varios dispositivos de generación de partículas basados en tecnologías diversas (fluidización, evaporación-condensación, abrasión), que permiten utilizar múltiples tipos de aerosoles; instrumentación de control y medida de los sistemas ensayados. La Figura 2 muestra una imagen de algunos de los elementos citados.

En cuanto a las labores analíticas, la Unidad dispone de varios códigos de sistema, como Contain 2.0 (Murata *et al.*, 1997), Sparc90 (Owczarski *et al.* 1991) o IODE (Liger *et al.*, 2002), y dos códigos integrales que representan, respectivamente, las líneas americana y europea de simulación en accidente severo: Melcor 2.1 (Randall *et al.*, 2011) y Astec 2.0 (Chatelard *et al.*, 2009). Además, se ha incorporado el uso de

herramientas de mecánica de fluidos computacional (Fluent 14.0) para aplicaciones específicas.

PRINCIPALES ACTIVIDADES

El Ciemat participa en un buen número de proyectos internacionales: Sarnet, Phebus-FP, ISTP, OECD-BIP, OECD-CCVM, OECD-SFP y Artist. Su naturaleza y alcance son diversos. Los siguientes subapartados permitirán, mediante la presentación de los resultados y actividades en curso de el Ciemat, dar una idea general de cada uno de ellos. Estos proyectos coexisten con líneas propias de actuación cuyo marco suelen ser acuerdos con instituciones y empresas nacionales.

Resultados recientes

Esta sección se ha estructurado de modo que permita dar, al menos, un ejemplo de cada una de las actividades en las que el Ciemat desarrolla su labor investigadora, ilustrando al mismo tiempo el papel jugado en los proyectos mencionados arriba.

La retención de productos de fisión en el lado secundario de un generador de vapor durante secuencias SGTR con fusión de núcleo ha sido

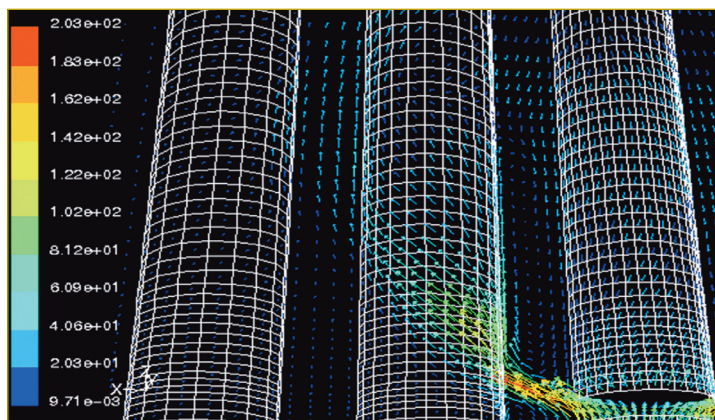


Figura 3. Mapa de velocidad del jet gaseoso emergente de la rotura en el haz de tubos (Fluent 6.2).

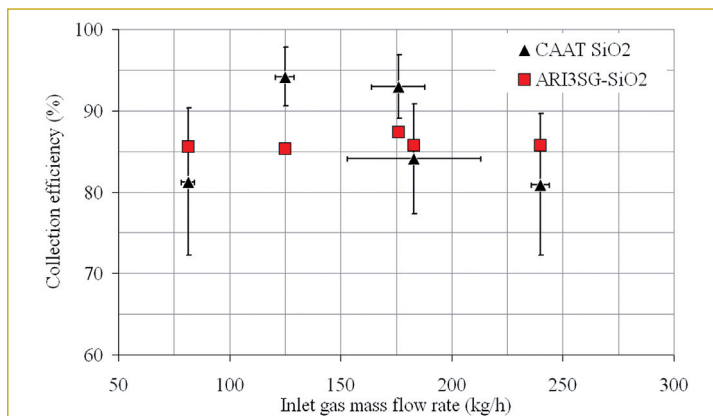


Figura 4. Ejemplo de validación de ARI3SG frente a ensayos CAAT con partículas de SiO₂.

el objetivo de la investigación de la serie de proyectos Artist (2002-2010). El Ciemat ha dedicado su atención al estudio de la descontaminación que ocurriría en las proximidades de la rotura. De su labor se han decantado dos productos principales: un modelo semi-empírico (ARI3SG) y una base de datos para su validación (CAAT). ARI3SG, basado en la aproximación de filtro, se desarrolla alrededor de su ecuación fundamental,

$$\eta_{TB} = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{1-\alpha} \left[1 - \prod_{i=1}^{N_T} \left(1 - \frac{d_i}{s+d_i} \cdot \eta_{ST}(i) \right) \right] \right\}$$

donde η_{TB} y η_{ST} son, respectivamente, las eficiencias de retención total y de un solo tubo; el resto son parámetros geométricos que caracterizan el haz de tubos alrededor de la rotura. Su derivación ha sido publicada por Herranz *et al.* (2012a). Entre sus elementos clave se halla la caracterización aerodinámica del flujo a través de los tubos (Figura 3), que fue realizada mediante el código Fluent (López del Prá *et al.*, 2010). Su validación (Figura 4) se ha realizado contra los datos generados en el propio laboratorio LASS de el Ciemat en la configuración denominada PECA-SGTR (Figura 5). Además, con objeto de conocer mejor

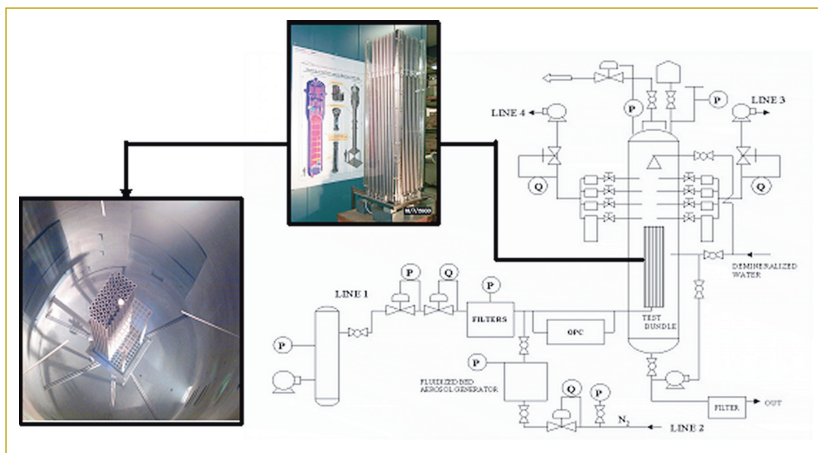


Figura 5. Diagrama de la instalación PECA-SGTR.

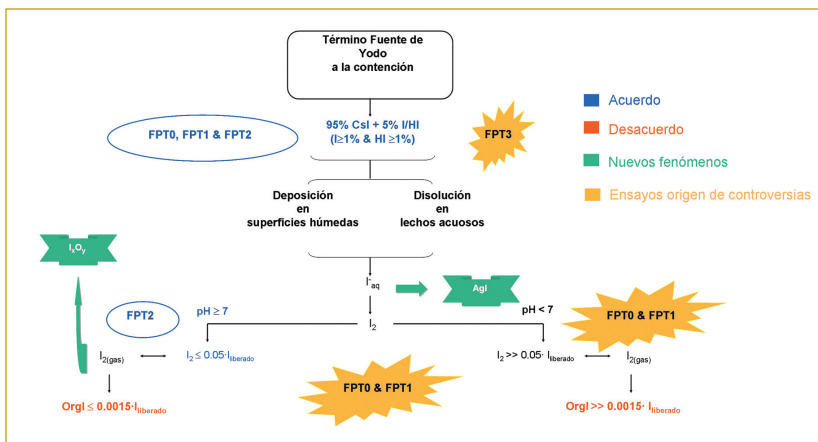


Figura 6. Comparación NUREG-1465/Phebus-FP.

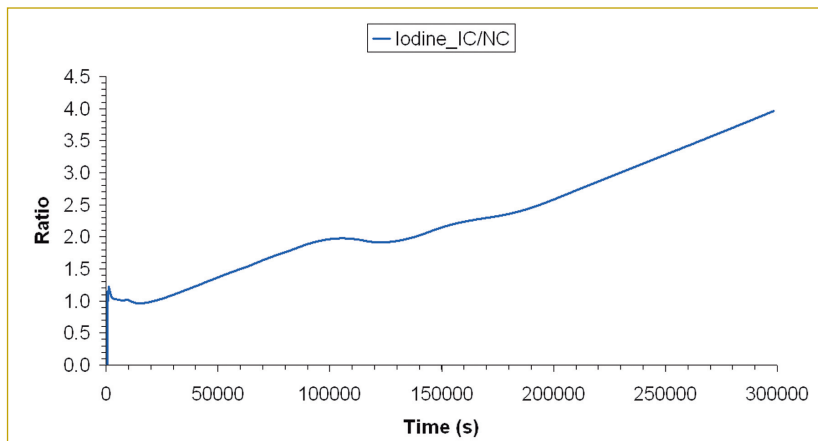


Figura 7. Efecto de la química del yodo en su liberación (razón IC/NC).

su capacidad predictiva se ha realizado el análisis de las incertidumbres del modelo, procedentes tanto de sus ecuaciones como de datos tales como la velocidad del gas o la densidad y el tamaño de las partículas (López del Prá *et al.*, 2012).

Por último, mediante un tratamiento estadístico se ha derivado una correlación dependiente de números adimensionales (Stk , número de Stokes; Re_p ,

número de Reynolds de las partículas), capaz de reproducir los resultados de ARI3SG con desviaciones promedio inferiores al 7%. Esta ecuación sería fácilmente integrable en los códigos de análisis de accidentes al uso:

$$\eta_{TB} = 0.47 \cdot \exp \left[-0.009 \cdot \left(\frac{Re_p^2}{Stk} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot Stk^{\frac{1}{4}}$$

Desde el año 2004 la investigación sobre accidente severo en Europa se

articula a través de Sarnet, proyecto en que participan 43 organizaciones de más de 20 países, entre ellos Suiza, EEUU, Canadá, India y Corea del Sur. Sus áreas fundamentales de actuación son: la refrigerabilidad del *corium*, la interacción entre el *corium* y el hormigón, las explosiones de vapor y las combustiones de H_2 en contención y el Término Fuente. Toda la investigación se emplea en construir dos plataformas fundamentales: una base de datos (Datanet) y el código franco-alemán Astec. El Ciemat participa en varias de las actividades planteadas, pero su papel más destacado es en Término Fuente (Haste *et al.* 2010), donde ha desarrollado contribuciones significativas en el área de los aerosoles (Herranz *et al.*, 2010a) y en química del yodo (Dickinson *et al.*, 2010). Entre ellas, y como ilustración del equilibrio entre investigación y aplicación, el Ciemat elaboró un análisis comparativo entre los principales resultados del proyecto Phebus-FP y lo que el Nureg-1465 establecía como bases para la estimación del término fuente. Sus conclusiones fueron resumidas por Herranz *et al.* (2010b) y quedan sintetizadas en la Figura 6.

El proyecto Phebus-FP es, sin duda, el más ambicioso realizado nunca en el área. Utilizando una instalación de gran tamaño única en el mundo (escala 1:5000 de un PWR de 900 MWe), se han realizado cinco experimentos, cuatro de ellos con combustible real irradiado. A partir de ellos se han obtenido datos representativos de la degradación del núcleo del reactor y de la liberación y transporte de productos de fisión a través de diversos componentes de una central. Basado en los resultados de dos de sus ensayos (FPT1 y FPT2), el Ciemat llevó a cabo un estudio sobre el impacto que tendría considerar la química del yodo en los análisis probabilistas de seguridad de nivel 2 (Herranz *et al.* 2009). Para ello escogió una secuencia cuyo escenario era similar al de los experimentos (secuencia de baja presión con rotura en rama fría y sin activación de ningún sistema de seguridad) y realizó la simulación con y sin consideración de la química del yodo (IC y NC, respectivamente). Según los resultados obtenidos con Melcor 1.8.6, la química del yodo podría incrementar la cantidad liberada en alrededor de un factor 2 en promedio (Figura 7), llegando a ser la fracción gaseosa de tal liberación en torno al 60% de la cantidad total liberada.

Pero más allá del uso de los resultados de Phebus-FP, el Ciemat ha contribuido activamente en los círculos

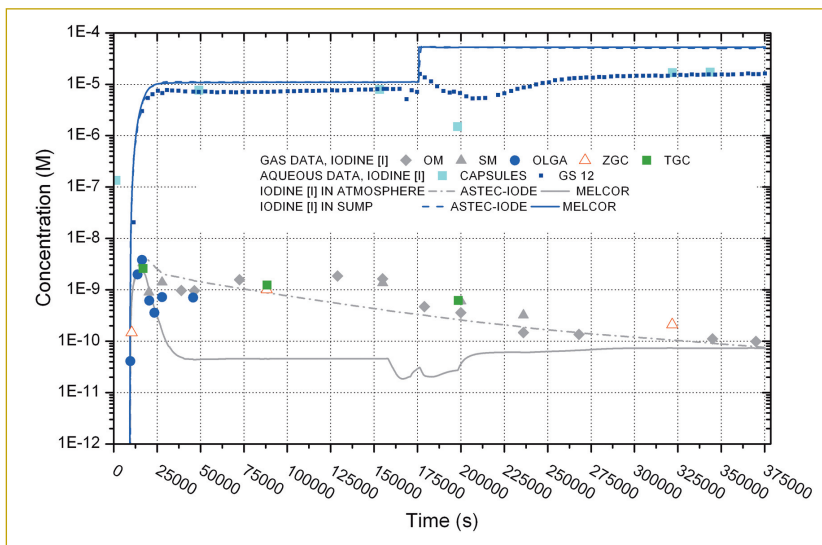


Figura 8. Distribución del yodo durante el experimento Phebus-FPT2.

de interpretación del proyecto. Ejemplo de ello es la interpretación de la distribución agua-gas del yodo en la contención del experimento Phebus-FPT2. Mediante el uso de Melcor y Astec (Figura 8), se señaló que el decrecimiento progresivo de la concentración en la fase gaseosa podría estar relacionado con la interacción del yodo con superficies pintadas en contacto con la atmósfera (Girault *et al.*, 2012). Este tipo de resultados tuvieron como consecuencia la génesis de los proyectos OECD-BIP e ISTP, donde uno de los principales fines es esclarecer la interacción del yodo con superficies pintadas y la posible generación de compuestos volátiles organoyodados cuya volatilidad podría ser incluso superior a la del yodo molecular (I_2).

Por último, también en el marco de Sarnet y basado en distintos programas experimentales, el Ciemat ha

desarrollado una intensa labor de validación de las sucesivas versiones habidas de Astec y Melcor, particularmente en lo que a termo-hidráulica y aerosoles en contención se refiere (Kljenak *et al.*, 2010). Redundando en el valor extraordinario del programa Phebus-FP, la Figura 9 muestra un ejercicio concreto de tales tareas de validación frente al experimento FPT2.

Proyectos incipientes

A las actividades citadas en la sección anterior, acompañan actualmente otras. Algunas son continuación y/o complemento de las anteriores, otras suponen una innovación en las líneas de actuación de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear. Entre estas últimas destaca la campaña de análisis de accidentes con pérdida total de energía eléctrica en centrales BWR3-Mark I con el código

Melcor, emprendida a partir de los sucesos acaecidos en Fukushima-1. Su finalidad es lograr una interpretación satisfactoria de la evolución del accidente, profundizando en aspectos concretos como el papel jugado por las piscinas de relajación de presión (Herranz *et al.*, 2012b). Recientemente, Nuclear España publicó un artículo centrado en estos trabajos (Herranz *et al.*, 2012c). Esta actividad se complementa con la participación en el proyecto OECD-SFP (*Spent Fuel Pool*), centrado en los escenarios con pérdida total de refrigerante en las piscinas de combustible; mediante una versión *ad-hoc* del código Melcor, el Ciemat está modelando la termo-hidráulica y la degradación del combustible, prestando especial atención a los aspectos relacionados con la ignición del material de vaina (i.e., tiempo de ignición, propagación del frente, cambio de cinética de oxidación, etc.).

Otras líneas innovadoras, también de carácter analítico, han sido la incorporación del análisis de incertidumbres a los análisis de accidente severo y la actualización de modelos MAAP de reactores españoles. La primera se ha iniciado tomando como escenario un experimento de la serie Phebus-FP y como herramienta de simulación, el código Melcor. El primer paso ha consistido en el diseño de un procedimiento que muestrea el dominio de incertidumbre de determinadas variables de modo aleatorio. La segunda se está realizando a través de la comparación de las respuestas de MAAP con datos de planta (transitorios) y simulaciones Melcor (secuencias de accidentes severos).

Finalmente, en el lado experimental de actividades y con un carácter más continuista, se está completando

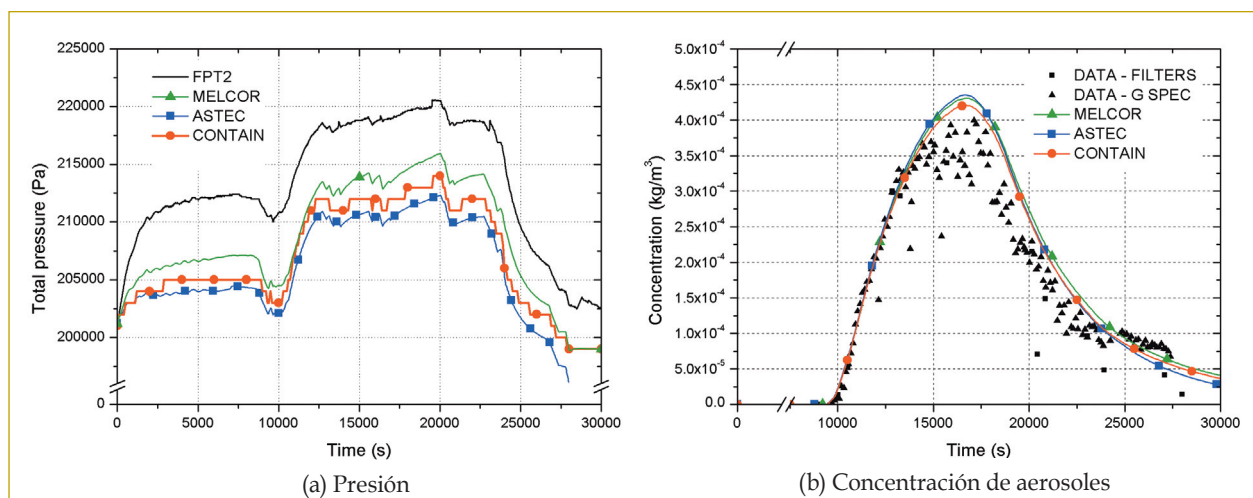


Figura 9. Ejemplo de validación de ASTEC frente a los resultados del ensayo Phebus-FPT2.

la labor experimental llevada a cabo en los proyectos Artist. El objetivo fundamental es extender la base de datos mediante la caracterización de los efectos de forma de rotura y tipo de aerosol. Además, se está investigando el papel de la vibración en la deposición neta de partículas sobre los tubos.

CONSIDERACIONES FINALES

Tan compleja como apasionante, la investigación en accidente severo es un ingrediente fundamental en la tecnología nuclear, no importa cuánto remota sea la probabilidad del suceso en cuestión.

Con más de 40 años de experiencia acumulada, el Ciemat ha desarrollado una aproximación al estudio de los accidentes severos que ha supuesto la asimilación de las metodologías de análisis más avanzadas, el desarrollo de capacidades propias teóricas y empíricas, el posicionamiento en la comunidad científica internacional y la retroalimentación entre ciencia y tecnología de seguridad nuclear en sus estudios. Sus resultados, ampliamente difundidos en foros y revistas nacionales e internacionales, ponen de manifiesto que el Ciemat está siendo capaz de aportar valor añadido al conocimiento en la materia. No obstante, la búsqueda de la excelencia y el compromiso con la innovación, mantiene despierto el espíritu de superación que conduce al crecimiento continuo de conocimiento y capacidad.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al CSN; su confianza y apoyo tecno-económico han propiciado gran parte de la investigación descrita en este artículo. Mi reconocimiento, asimismo, a las personas que en la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear desarrollan su labor profesional en la lid de la investigación sobre accidente severo; su capacidad y dedicación son los pilares de este trabajo.

REFERENCIAS

- ANSYS, Fluent Tutorial Guide, 2011.
- Chang R., Schaperow J., Ghosh T., Barr J., Tinkler C., Stutzke M., State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis (SOARCA) Report, NUREG-1935, 2012.
- Chatelard P., Reinke N., Overview of the integral code ASTEC V2.0, DPAM/SEMCA 2009-149, 2009.
- Dickinson S., Andreo F., Karkela T., Ball J., Bosland L., Cantrel L., Funke F., Girault N., Holm

- J., Guilbert S., Herranz L.E., Housiadas C., Ducros G., Mun C., Sabroux J.-C., Weber G., Recent advances on containment iodine chemistry, Progress in Nuclear energy 52, 128-135, 2010.
- Girault N., Bosland L., Dickinson S., Funke F., Güntay S. Herranz L.E., Powers D., LWR severe accident simulation: Iodine behaviour in FPT2 experiment and advances on containment iodine chemistry, Nuclear Engineering and Design 243, 371-392, 2012.
- Kljenak I., Dapper M. Dienstbier J., Herranz L.E., Koch M., Fontanet J., Thermal-hydraulic and aerosol containment phenomena modeling in ASTEC severe accident computer code, Nuclear Engineering and Design 240, 656-667, 2010.
- Liger K., Cantrel L., IODE 5.1 Description, Note Technique SEMAR 02/03, 2002.
- López del Prá, Velasco F.J.S., Herranz L.E., Simulation of a gas jet entering the secondary side of a steam generator during a SGTR sequence: Validation of a FLUENT 6.2 model, Nuclear Engineering and Design 240, 2206-2214, 2010.
- López C., Herranz L.E., ARI3SG: Aerosol retention in the secondary side of a steam generator. Part II: Model validation and uncertainty analysis, Nuclear Engineering and Design 248, 282-292, 2012.
- Haste T., Giordano P., Herranz L., Girault N., Dubourg R., Sabroux J.-C., Cantrel L., Bottomley D., Parozzi F., Auvinen A., Dickinson S., Lamy J.-C., SARNET integrated European Severe Accident Research – Conclusions in the source term area, Nuclear Engineering and Design 239, 3116-3131, 2009.
- Herranz L.E., García M., Otero B., Iodine chemistry effects on source term assessments: A MELCOR 1.8.6. YT of a PWR severe accident sequence, Proceedings ICAPP'09, Paper 9340, Tokyo (Japan), 2009.
- Herranz L.E., Ball J., Auvinen A., Bottomley D., Dehbi A., Housiadas C., Piluso P., Layly V., Parozzi F., Reeks M., Progress in understanding key aerosol issues, Progress in Nuclear Energy 52, 120-127, 2010a.
- Herranz L.E., Clément B., In-containment source term : Key insights gained from a comparison between the PHEBUS-FP programme and the US-NRC NUREG-1465 revised source term, Progress in Nuclear Energy 52, 481-486, 2010b.
- Herranz L.E., López C., ARI3SG: Aerosol retention in the secondary side of a steam generator. Part I: Model essentials, verification and correlation, Nuclear Engineering and Design 248, 270-281, 2012a.
- Herranz L.E., García M., López C., Pool scrubbing in Fukushima-like scenarios: Modeling status and major challenges, Proceedings of 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS), N9P0255, Kaohsiung (Taiwan), Septiembre 9-13, 2012b.
- Herranz L.E., García M., Fukushima: El accidente severo, Nuclear España 327, 11-17, 2012c.
- Murata, K.K., Williams, D.C., Tills, J., Griffith, R.O., Gido, R.G., Tadios, E.L., Davis, F.J., Martinez, G.M., Washington, K.E., Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis, NUREG-CR-6533, 1997
- Owczarski p.c., Burk K. W., SPARC-90: A Code for Calculating Fission Product Capture in Suppression Pools, NUREG-CR-5765, 1991.
- Sánchez-Velasco F.J., López del Prá C., Herranz L.E., Aerosol retention in the vicinity of abreach in a tube bundle: An experimental investigation, Aerosol Science and Technology 44, 349-361, 2010.
- SNL, MELCOR Computer Code Manuals. Reference Manual Version 2.1 Draft, NUREG/CR-6119, vol. 2, 2011.
- Soffer L., Burson S.B., Ferrell C. M., Lee R.Y., Ridgely J.N., Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants, NUREG-1465, 1995.
- U.S. Atomic Energy Commission, Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740, 1957.
- U.S. Atomic Energy Commission, Siting Criteria, TID 14844, 1959.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, 1975.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, 1990. ■