

Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible ATF

César Queral

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Jornada de I+D+i 2023.

Proyectos de Investigación en el CSN



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Proyecto “Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible ATF” Subvención CSN: SUBV-16/2021

Participantes

- **César Queral Salazar (UPM)**
- Oscar Cabellos de Francisco (UPM)
- Kevin Fernandez Cosials (UPM)
- Rafael Miro Herrero (UPV)
- Teresa Barrichina Célda (UPV)
- Javier Gómez Magán (UPM)
- Jorge Sánchez Torrijos (UPM)
- Sergio Courtin Vega (UPM)
- David Canal (UPM)



Definición de ATF

According to the NRC:

“ ATF is a set of new technologies that have the potential to enhance safety at nuclear power plants by offering better performance during normal operation, transient conditions, and accident scenarios”

Evolution of the main objectives pursued regarding ATF designs:

**Initial approach,
ATF related to safety issues**

ATF = Accident Tolerant Fuels focused on:

- Enhancing fuel rod behavior **under accident conditions.**
- Increasing of safety margins under accident conditions
- Mainly devoted to dealing with LOCA and SBO accidents.

**Current approach,
ATF related to safety and operational issues**

ATF = Advanced Technology Fuel aiming at:

- Enhancing fuel rod behavior under **normal, DBA and BDBA.**
- Increasing safety margins considering also normal operation conditions.
- Reaching higher enrichments and burnups.
- Improving fuel cycle economics.

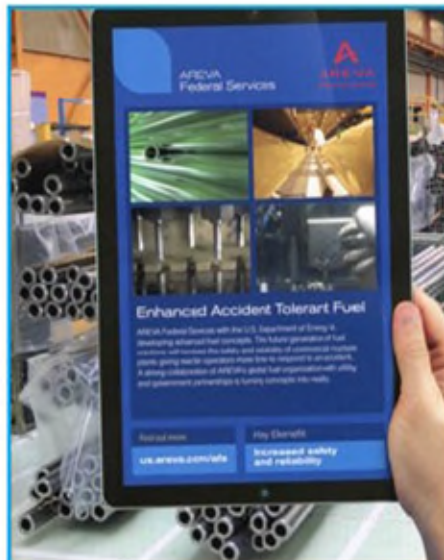
CLASIFICACIÓN DE LOS ATFs

ATF	CLADDINGS	FUELS
EVOLUTIONARY (Near-term)	New Zr alloys Coated Zr cladding (Cr-Zr) Advanced steels (Fe-Cr-Al with Y and Mo alloys)	Doped UO₂ (e.g Cr ₂ O ₃) High Thermal Conductivity UO ₂ Dual-cooled fuel
REVOLUTIONARY (Long-Term)	Refractory Metals (Lined Mo-alloy) SiC Composite	High density fuels [UN] ,[U ₃ Si ₂] (Nitride, Carbide, Silicide, Metallic Fuels) Microencapsulated fuels (TRISO-SiC composite pellets)

DOE is providing with funds to several vendors to develop several ATF concepts (≈ 200 M\$)

- Framatome

- Chrome coated zirconium cladding
- Doped uranium dioxide fuel



- General Electric

- Iron-chrome-aluminum cladding (FeCrAl)
- Conventional uranium dioxide fuel



- Westinghouse

- Silicon carbide cladding
- Uranium silicide fuel



IAEA-CRPs (Coordinated Research Projects):

1. Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (**ATF-TS**):

- **Starting Date:** 06/04/2020
- **Status:** Active - Ongoing
- **Specific Objectives:**
 1. Performing experimental tests on ATF's performance under normal, DB and DBE conditions.
 2. Performing benchmarking activities of fuel codes using the data obtained during the CRP or existing one.
 3. To develop LOCA evaluation methodology for ATF performance with a view for NPP application
- **Project website:** <https://www.iaea.org/projects/crp/t12032>

IAEA-CRPs (Coordinated Research Projects):

2. Analysis of Options and Experimental Examination of Fuels for Water-Cooled Reactors with Increased Accident Tolerance (**ACTOF**):

- **Starting Date:** 08/07/2015
- **Status:** Closed - concluded
- **Specific Objectives:**
 1. Acquisition of experimental data on new fuel types and cladding materials to support their use as ATF.
 2. To support modelling of the new ATFs by simulation tools.
- **Project website:** <https://www.iaea.org/projects/crp/t12030>
- **Main outcomes extracted from the ACTOF project:**
 - Several coated claddings have been tested, characterized and analyzed:
 - Long-Term corrosion test: Low weight gain and similar or higher H pick up for Cr-coatings.
 - High-Temperature test: No severe degradation in coated samples, remaining ductility.
 - Materials characterization and models for:
 - Fuel: U₃Si₂
 - Cladding: FeCrAl and SiC
 - FeCrAl benchmark activity performed (Normal operating and LOCA conditions)
 - Severe accident test for FeCrAl cladding and post-test modelling
 - Identification of future lines of work

European Projects:

- **H2020, 'IL TROVATORE':**
 - Starting Date: 01/10/2017
 - Status: **Active – Ongoing**
 - Objectives:
 - **Identify** and **optimize** the most promising **ATF cladding material** concepts for GEN II/III LWRs
 - Project website: <https://iltrovatore-h2020.eu>
- **H2020, Reduction of Radiological Consequences of design basis and extension Accidents (R2CA):**
 - Starting Date: 01/09/2019
 - Status: **Active - Ongoing**
 - Objectives:
 - Realistic evaluation of the radionuclide release during LOCA and SGTR sequences.
 - Improvement of the accident management procedures, the development of innovative instrumentation and early diagnosis tools, **the evaluation of promising E-ATF concepts.**
 - Project website: <https://r2ca-h2020.eu>

European Projects:

- **H2020, High-Performance Advanced Methods and Experimental Investigations for the Safety Evaluation of Generic Small Modular Reactors (McSAFER):**
 - Starting Date: 01/09/2020
 - Status: Active – Ongoing
 - Objective related to ATF: **Improve the thermo-mechanical simulations of SMRs under static and accidental conditions (including ATF).**
 - Project website: <https://mcsafer-h2020.eu/>

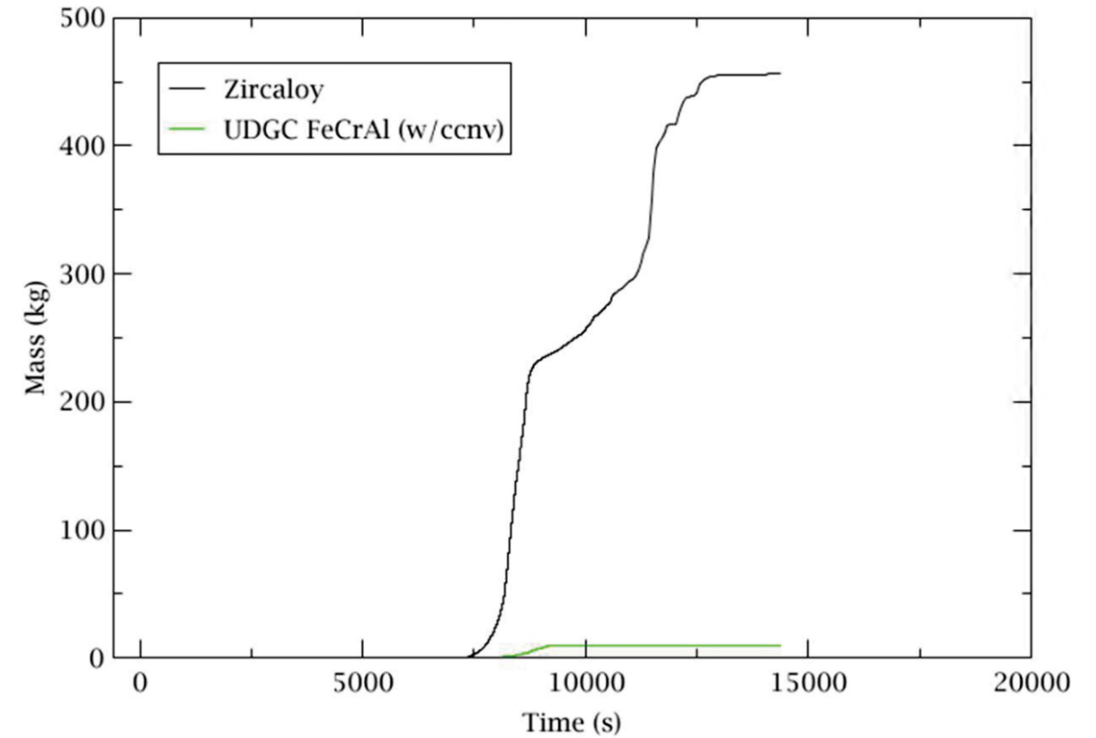
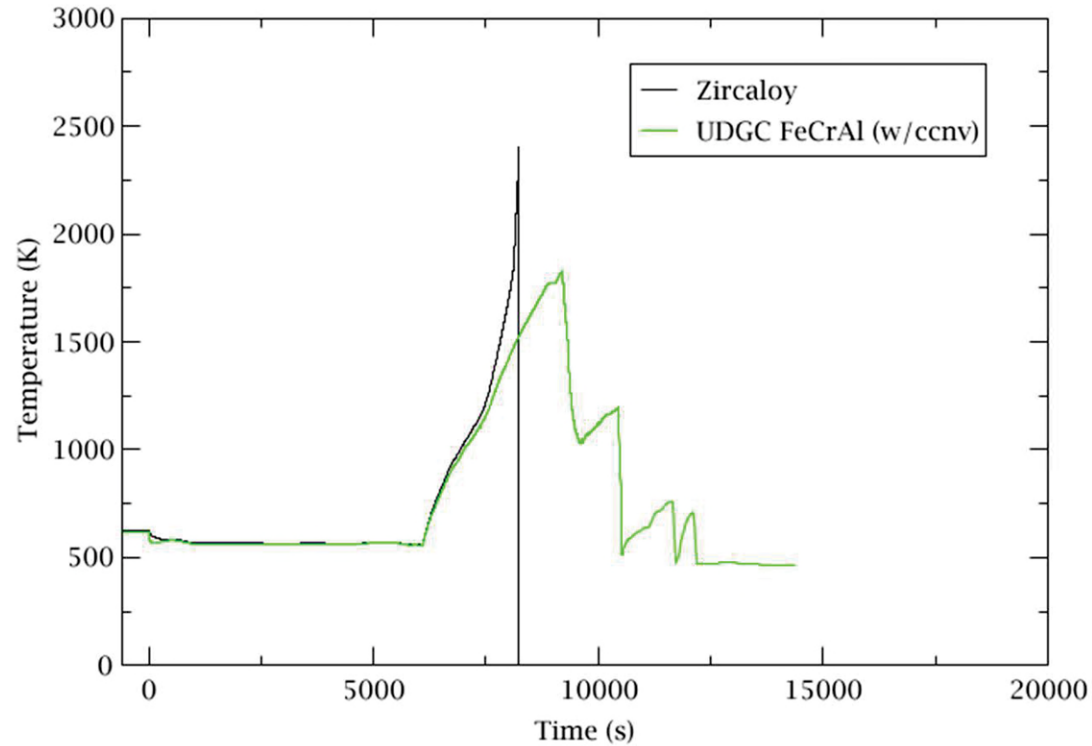
1. Análisis del impacto del uso de los combustibles **ATF en operación flexible** con reactores PWR.
2. Cuantificación de incremento de **márgenes de tiempo para actuaciones del operador** en secuencias dominantes del APS
3. Cuantificación del incremento de los **márgenes de seguridad en análisis deterministas** de centrales PWR y BWR, secuencias de LBLOCA.
4. Cuantificación del **incremento de los márgenes de tiempo en secuencias de accidente severo** en centrales PWR y BWR.
5. Organización de **seminarios/cursos** relacionados con el análisis de márgenes de seguridad y el combustible ATF.

1. **Análisis bibliográfico de los modelos termo-mecánicos** necesarios para simular el comportamiento del combustible ATF
2. **Análisis bibliográfico de las secuencias de interés**, tanto desde el punto de vista del análisis probabilista (**APS**) como determinista (**ADS**) en reactores PWR.
3. Simulación de secuencias de **MBLOCA y SBLOCA en PWR para cuantificar los márgenes de tiempo para actuación de los operadores** con combustible convencional y ATF (TRACE).
4. Simulación de secuencias de **SBO en PWR para cuantificar los márgenes de tiempo para actuación de los operadores** con combustible convencional y ATF (TRACE)
5. Simulación de secuencias de **seguimiento de carga en reactores PWR**. Impacto del combustible ATF (**SEANAP**).
6. Simulación de secuencias de **LBLOCA en PWR** mediante técnicas de Monte Carlo para cuantificar los márgenes de seguridad con combustible convencional y ATF (TRACE).
7. Simulación de secuencias de **LBLOCA en BWR** mediante técnicas de Monte Carlo para cuantificar los márgenes de seguridad con combustible convencional y ATF (TRACE).
8. Estudio del **Accidente Severo en centrales con combustible ATF** (MELCOR). Modificaciones necesarias en el código y análisis de las secuencias.
9. Actividades de **divulgación**

- Métricas para la evaluación y selección de materiales candidatos a ATF
- Impacto de los ATF en la operación normal y operación flexible (PCMI)
- Propiedades y modelos termomecánicos de los ATF
- Resultados experimentales
- Proyectos internacionales (IAEA CRP ATF-TS; McSafer)
- Secuencias accidentales (LOCA, SBO, RIA ...)
- Secuencias de accidente severo
- Impacto de los ATF en los APS
- Criterios de fallo y criterios de aceptación en AOO/DBA

Tareas 1/2. Análisis bibliográfico

Accidente de TMI. Incorporación del FeCrAl

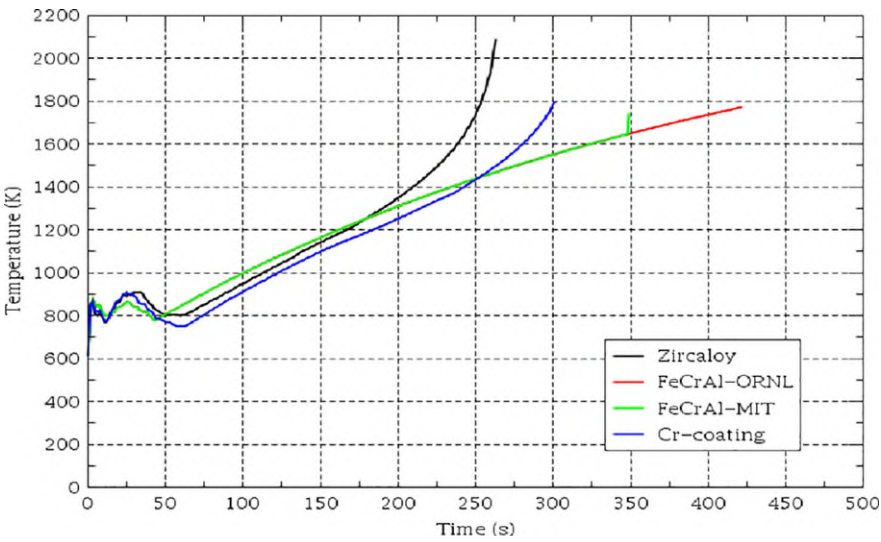


Humrickhouse and Merrill, 2017, 'Status Report on Modifications to the MELCOR code for modelling ATF', INL/EXT-17-43162

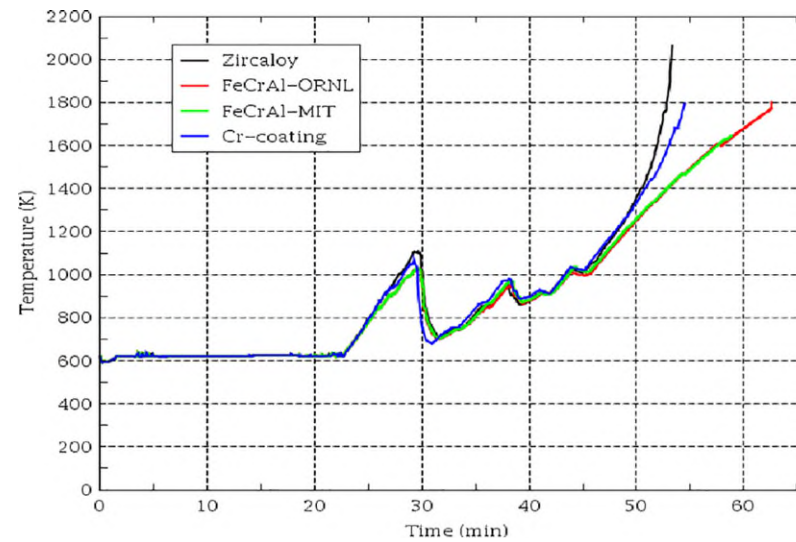
Tareas 1/2. Análisis bibliográfico

IMPACTO DE DISTINTOS ATF EN SECUENCIAS ACCIDENTALES

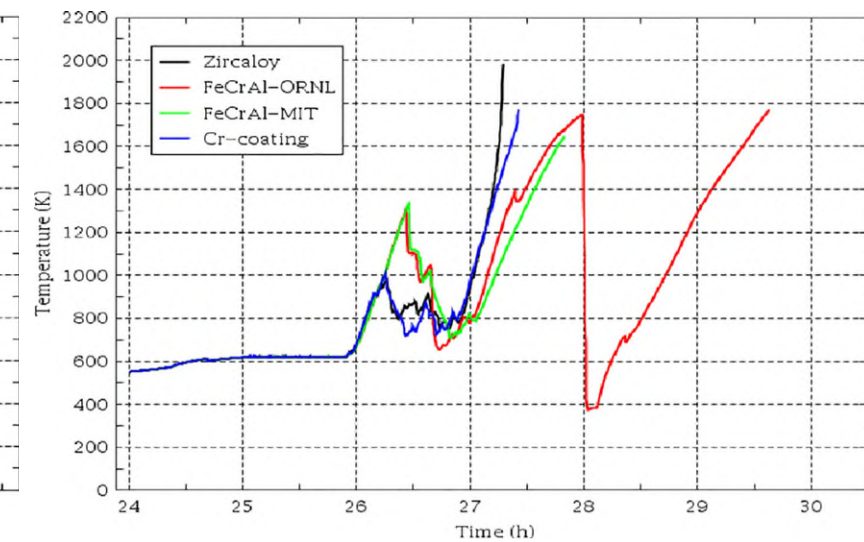
LARGE-BREAK LOCA



SHORT-TERM SBO



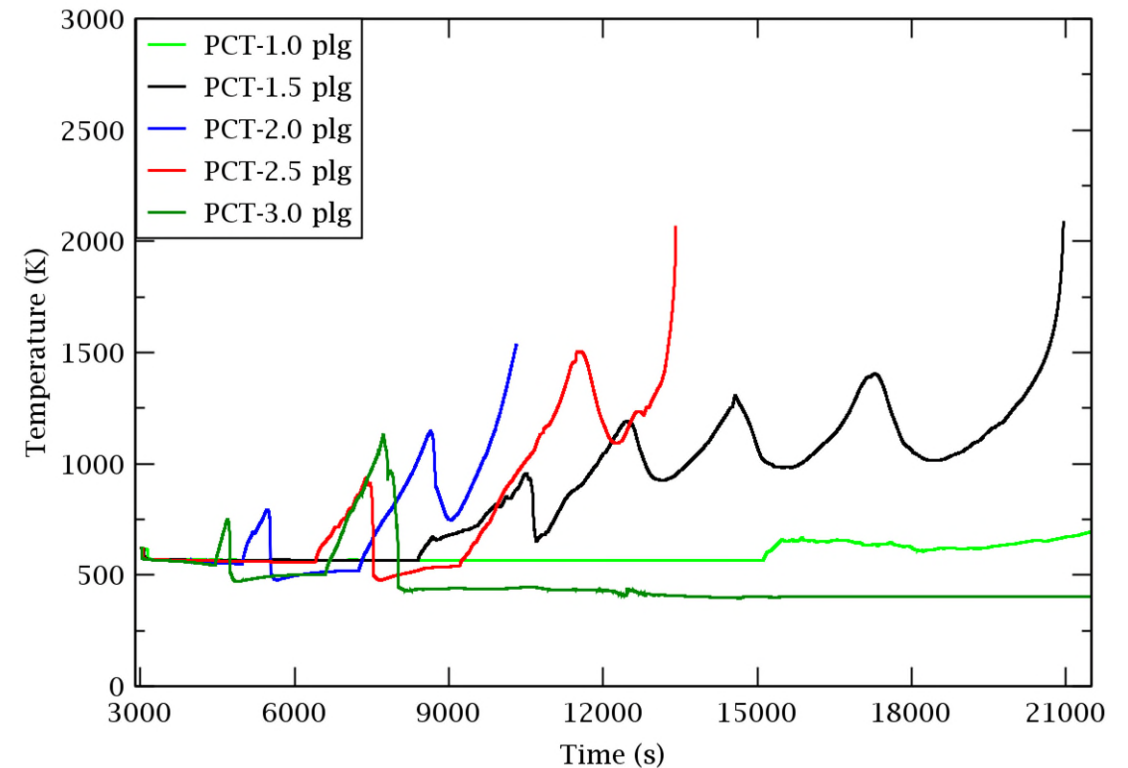
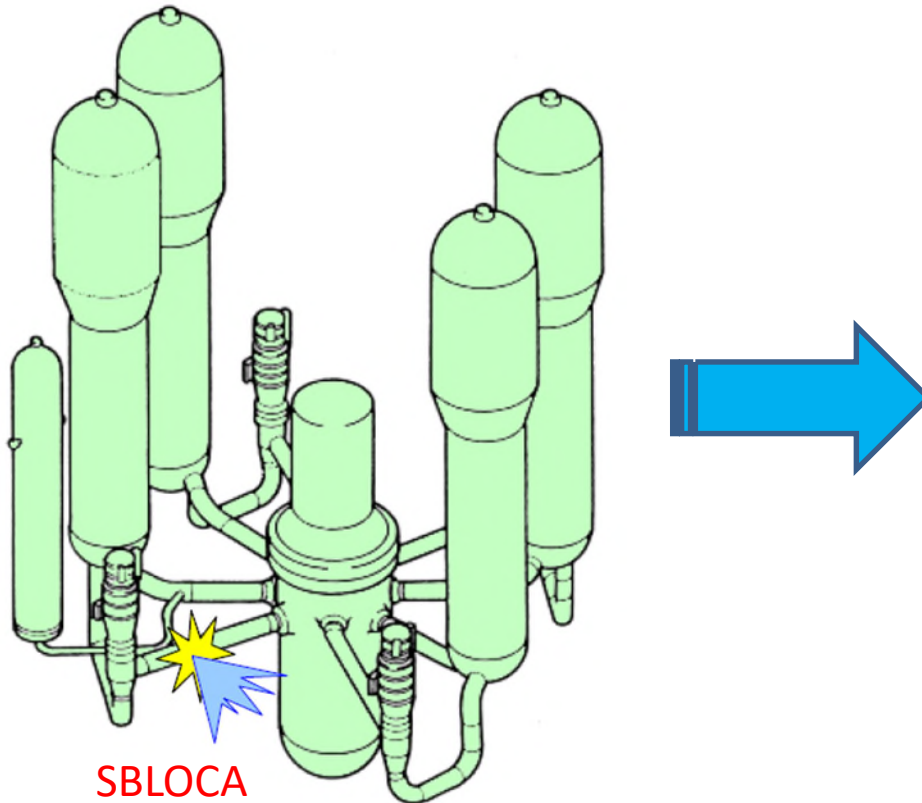
LONG-TERM SBO



Tarea 3. Secuencias de MBLOCA y SBLOCA en PWR con fallo HPSI (TRACE).

SBLOCA/MBLOCA en PWR con fallo del HPSI. Se analizan:

- los tiempos de daño con vainas de Zry / ATF (pendiente)
- tiempos disponibles para las acciones humanas
- los tiempos de inyección de acumuladores, inyección del sistema LPSI y
- el tiempo de condición de refrigeración inadecuada del núcleo (ICC).



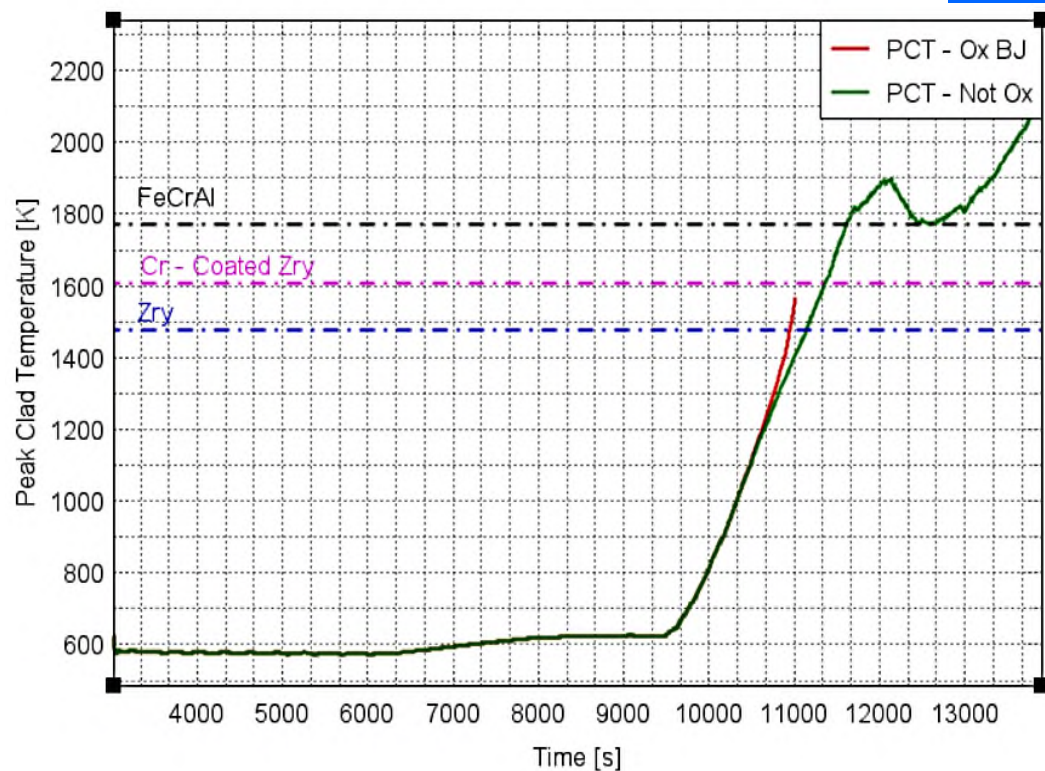
Tarea 4. Simulación de secuencias de SBO y otras secuencias en PWR

SBO con sellos térmicos pasivos

SBO. T= 3000 s

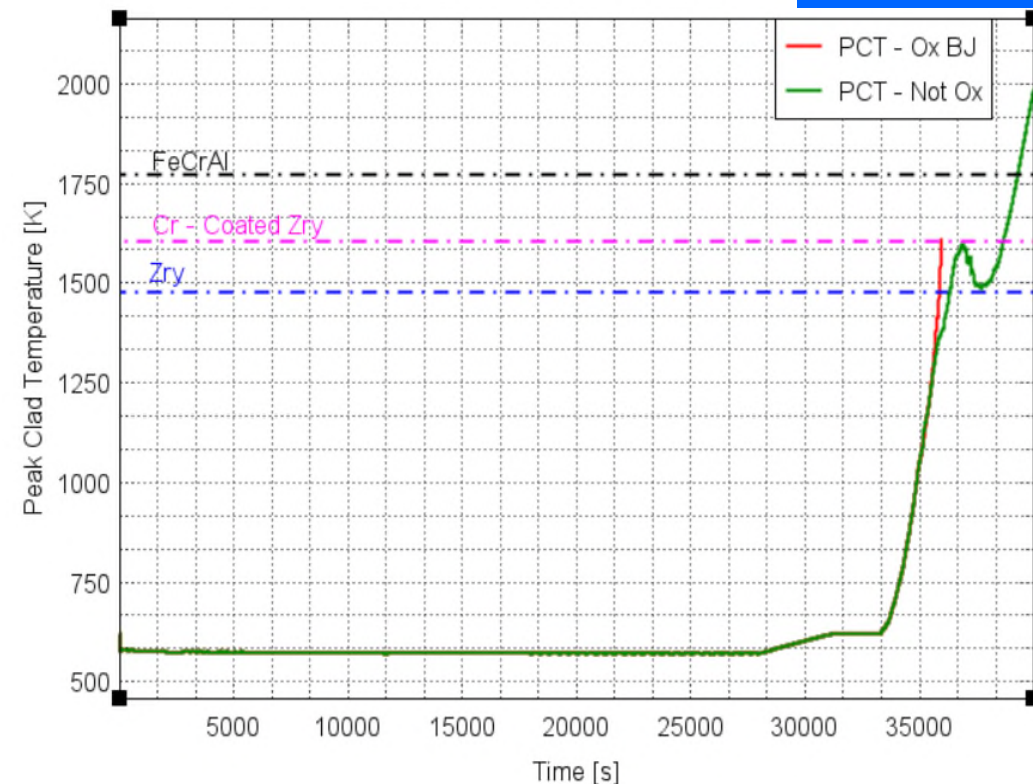
ST-SBO. 0h TDP-AFW sin SLOCA. TRACE

$\Delta t \approx 5 \text{ min}$



LT-SBO. 4h TDP-AFW sin SLOCA. TRACE

$\Delta t \approx 15-20 \text{ min}$



CSNI “*Applicability of Nuclear Fuel Safety Criteria to Accident-tolerant Fuel Designs*” CSNI Technical Opinion Paper No. 19 2022.

Tarea 4. Simulación de secuencias de SBO y otras secuencias en PWR

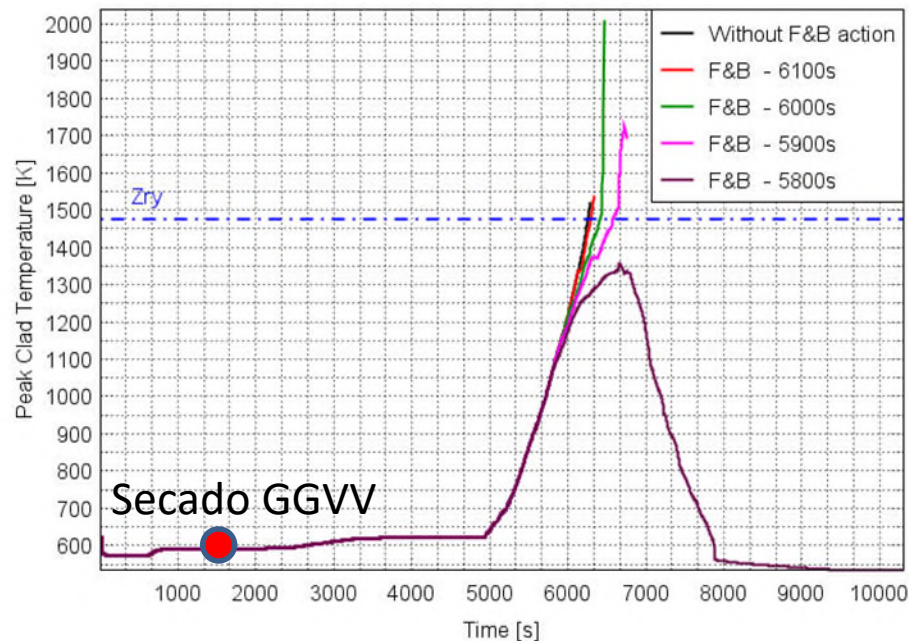
Aplicación a un modelo genérico de APS nivel 1 (sucesos internos)

- Análisis de las acciones humanas (AH) incluidas en el modelo Westinghouse genérico en RiskSpectrum
- AH cuyo tiempo disponible se puede ver influenciado por la incorporación de vainas ATF
- Incorporación de las variaciones de tiempos disponibles para distintos ATF
- Cuantificación de la CDF sin/con vainas ATF
- Obtención de la reducción del riesgo sin cambiar criterios de aceptación ($\Delta\text{CDF} < 20\%$)
- *En la literatura se encuentran reducciones del 5%-10% de CDF en PWR/BWR para Cr-Zry y FeCrAl*

Tarea 4. Simulación de secuencias de SBO y otras secuencias en PWR

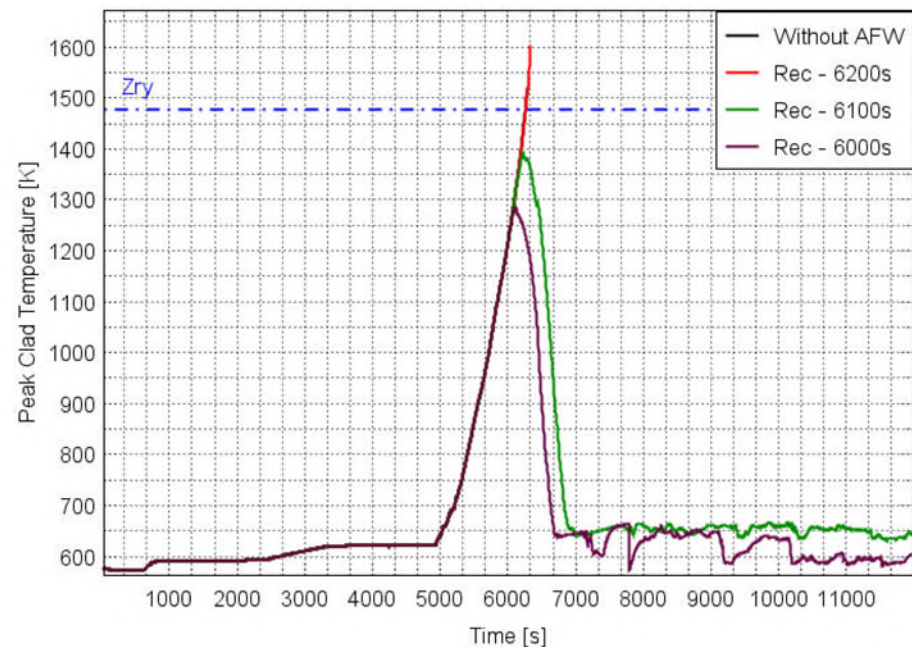
Pérdida de AA principal y auxiliar. Aporte y purga (feed and bleed)

Combustible convencional – Zry. TRACE



Feed and bleed

$$T_D \approx 4400 \text{ s}$$



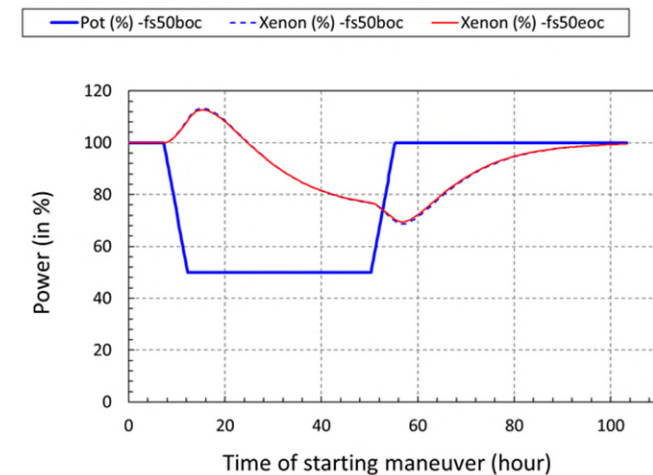
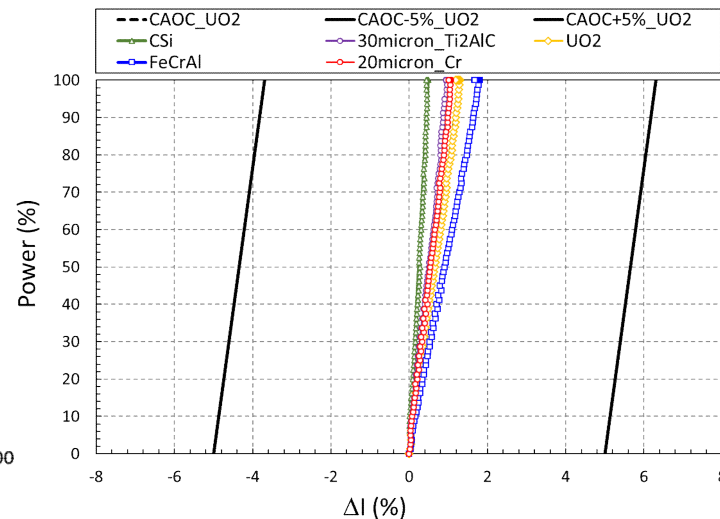
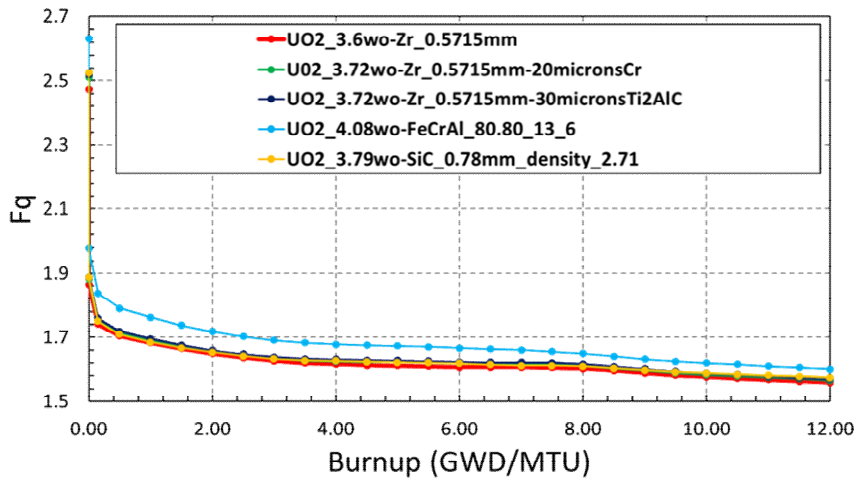
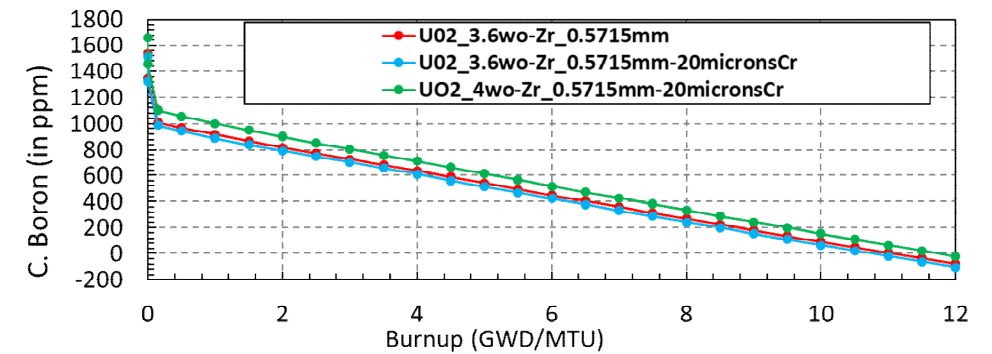
Recuperación AFW

$$T_D \approx 6000 \text{ s}$$

En una segunda fase se calcularán los tiempos disponibles para distintas vainas ATF

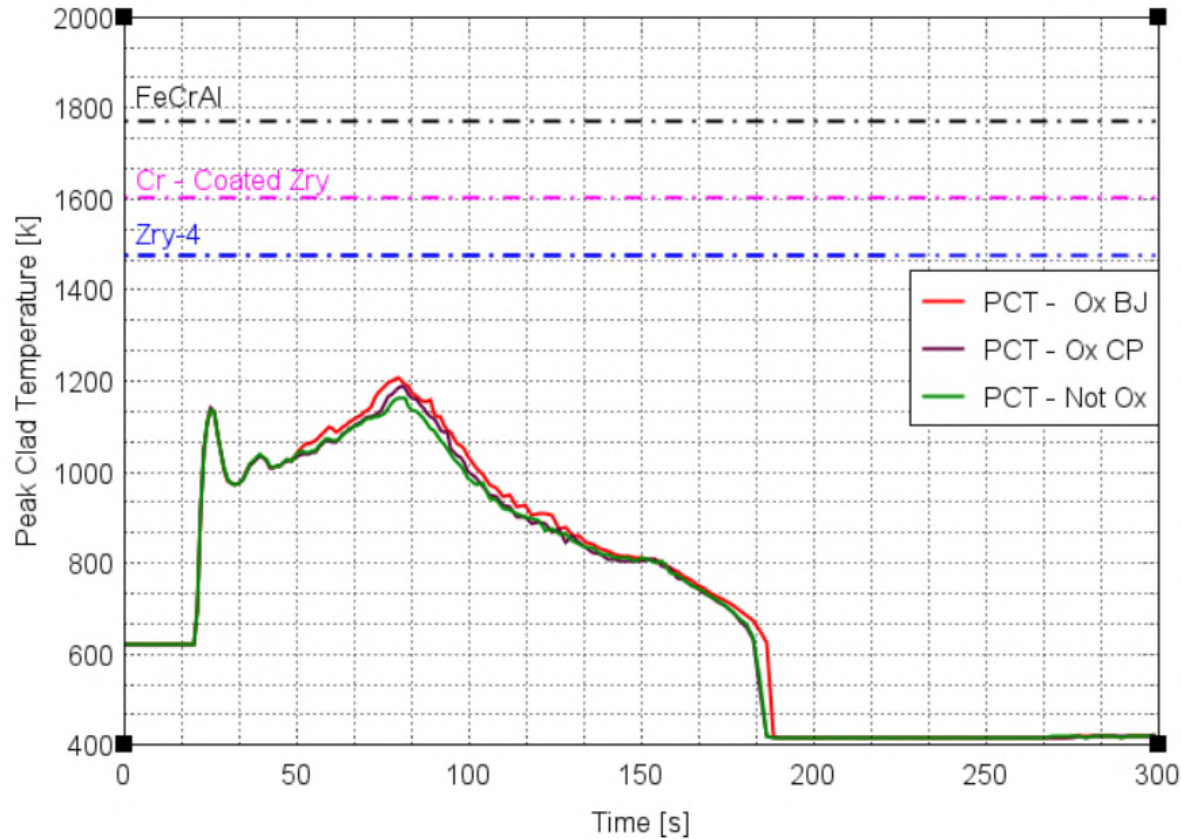
Tarea 5. Simulación de secuencias de seguimiento de carga en reactores PWR

- Obtención de las secciones eficaces de los distintos materiales (recubrimiento de Cr, FeCrAl, SiC)
- Aplicado a un PWR Westinghouse 3 lazos en el modelo disponible en el sistema **SEANAP** (ETSII – UPM)
- El combustible ATF se ha considerado solo en el combustible nuevo de un ciclo
- Ajuste del enriquecimiento para igualar la duración del ciclo
- Obtención de los factores de pico en el nuevo núcleo (F_Q , $F_{\Delta H}$)
- Análisis de escenarios de operación flexible (*en proceso*)
- Análisis termomecánico con TU (*pendiente*)



Tarea 6. Simulación de secuencias de LBLOCA en PWR con Monte Carlo

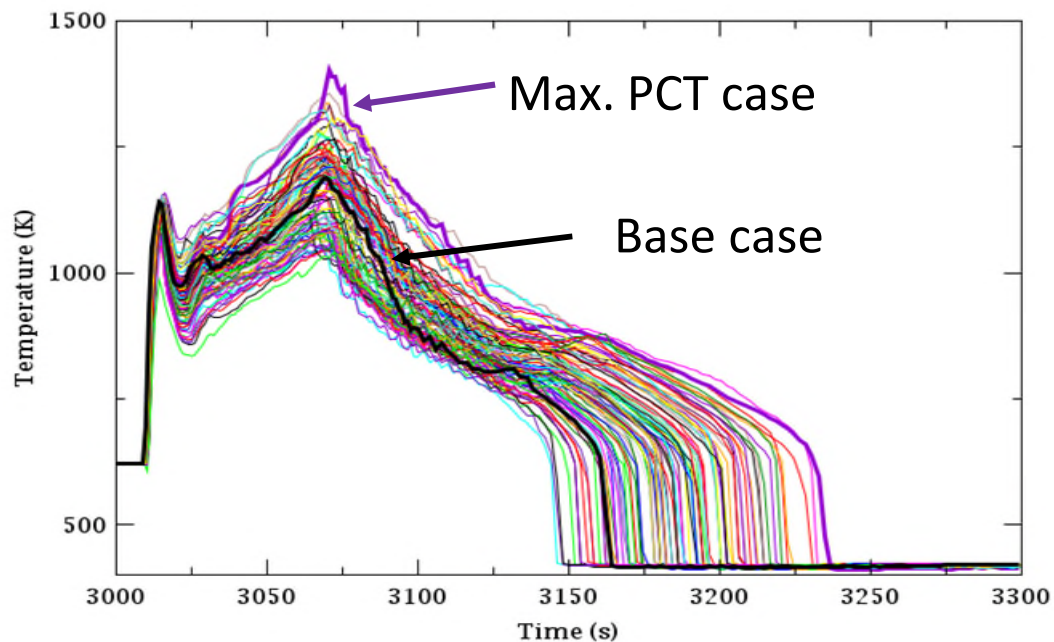
Combustible convencional – Zry. TRACE



Parameter	VARIABLE	PDF	PDF included in the TRACE model	REFERENCES	
P1	Break discharge coeff.	BreakCD1, BreakCD2	Normal (factor)	$\mu:0.947, \sigma:0.109, [0.729, 1.165]$	LEE-16
P2	Initial Core Power	RPOWI	Normal (factor)	$\mu:1, \sigma:0.05, [0.99, 1.01]$	NEA-09
P3	Decay Heat	DecayHeat	Normal (factor)	$\mu:1, \sigma:0.4, [0.92, 1.08]$	NEA-09
P4	Power peaking factors	RPKF (all HTSTR)	Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.025, [0.95, 1.05]$	NEA-09
P5	Forced Convection HTC		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.127, [0.746, 1.254]$	LEE-16
P6	Forced Convection HTC		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.127, [0.746, 1.254]$	KAN-16
P7	Film Boiling HTC		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.1864, [0.6272, 1.3728]$	NEA-09, KAN-16
P8	Transition Boiling HTC		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.149, [0.702, 1.298]$	KAN-16
P9	Critical Heat Flux		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.178, [0.644, 1.356]$	NEA-09, DON-13
P10	Accumulator Pressure	ACC_Pressure	Normal (scalar)	$\mu:4.278E6, \sigma:1.0E5, [4.176E6, 4.576E6]$	NEA-09
P11	HPSI / LPSI injection factor	HPSI_LPSIFator	Uniform (factor)	[0.93, 1.07]	It comes from the conservative hypothesis, other BEPUs have normal with 5%.
P12	RCP broken loop speed	RCPbrokenSpeed	Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.05, [0.9, 1.1]$	NEA-09,
P13	RCP intact loop speed	RCPunbrokenSpeed	Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.01, [0.98, 1.02]$	NEA-09,
P14	Gap conductance		Uniform (factor)	[0.67, 1.5]	KAN-16
P15	Gap width (FALCON)	Gap_delta	Normal (factor)	$\mu:1, \sigma:0.01, [0.8, 1.2]$	NEA-09, KIM-12, XIO-20
P16	Cladding thickness	CladdingThick	Normal (scalar)	$\mu:5.715E-4, \sigma:2.0E-5, [5.315E-4, 6.115E-4]$	LEE-14a
P17	Pellet radius	Fuel_radial	Normal (scalar)	$\mu:4.0957E-3, \sigma:3.25E-6, [4.0892E-3, 4.1022E-3]$	LEE-14a
P18	Pellet dish depth	pelletDishDepth	Normal (scalar)	$\mu:1.2E-4, \sigma:2.5E-5, [7.0E-5, 1.7E-4]$	LEE-14a
P19	Pellet shoulder width	PelletShoulderwidth	Normal (scalar)	$\mu:1.625E-3, \sigma:1.25E-4, [1.375E-3, 1.875E-3]$	LEE-14a (dish diameter)
P20	Rod plenum height	RodPlenumHeight	Normal (scalar)	$\mu:0.19456, \sigma:4.915E-3, [0.18473, 0.20439]$	LEE-14a (one pellet)
P21	Fuel density	FuelDensity	Normal (scalar)	$\mu:0.955, \sigma:4.34525E-3, [0.9463, 0.9637]$	LEE-14a
P22	Fuel thermal conductivity		Uniform (factor)	[0.845-1.155]	NUREG-7024, LEE-14a
P23	Burst temperature coefficient		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.046, [0.908, 1.092]$	SSM-15, Table 25 pg 56
P24	Metal-water reaction coefficient		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.03, [0.94, 1.06]$	LEE-14a
P25	Containment pressure	Containment_Pressure_FACTOR	Uniform (factor)	[0.85, 1.15]	NEA-09
P26	Accumulator Temperature	Accum_Temp	Normal (scalar)	[300.92, 320.92]	MAR-16
P27	Gap pressure (FALCON)	PGAP	Uniform (factor)	[0.9, 1.1]	QUE-15, LEE-16
P28	Burst Strain coefficient		Uniform (factor)	[0.86, 1.07]	KIN-17
P29	Initial oxide layer	OxLyer (all HTSTR)	Uniform (factor)	[0.6, 1.4]	NUREG/CR-7001, LEE-14a
P30	PZR level	TmediaFict_PZRlevel	Normal (scalar)	$\mu:0.0, \sigma:0.215, [-0.43, 0.43]$	NEA-09, KIM-12 [-10; 10] cm
P31	ACC inventory	ACC_alphaLevel	Normal (factor)	$\mu:0.0, \sigma:0.05, [-0.9, 1.1]$	FRE-12
P32	Fric. ACC discharge lines	ACC_dischargeLines	lognormal (scalar)	[0.5, 2]	KIM-12
P33	HPSI/LPSI temperature	SI_TEMP	Uniform (scalar)	[277.15, 322.15]	LEE-16
P34	PZR pressure	Pzrpress	Uniform (scalar)	[153.67, 157.07]	Plant uncertainty measure (+/-1.69kg/cm2)
P35	TminWall		Uniform (factor)	(0.95,1.05)	NEA-09,
P36	Interfacial drag		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.25, [0.5, 1.5]$	NEA-09
P37	CCFL SG-inlet c	CCFL_SGs_coef	Uniform (scalar)	[0.5,1.5]	FRE-19
P38	CCFL SG-inlet m	CCFL_SGs_slope	Uniform (scalar)	[0.5,1.5]	FRE-19
P39	CCFL UP c	CCFL_CorePlate_coef	Uniform (scalar)	[0.5,1.5]	FRE-19
P40	CCFL UP m	CCFL_CorePlate_slope	Uniform (scalar)	[0.5,1.5]	FRE-19
P41	CCFL Hot leg c	CCFL_HLs_coef	Uniform (scalar)	[0.52, 0.95]	MAR-16, FRE-19
P42	CCFL Hot leg m	CCFL_HLs_slope	Uniform (scalar)	[0.397, 1.0]	MAR-16, FRE-19
P43	Interface heat transfer coefficient (subcooled)		Normal (factor)	$\mu:1.0, \sigma:0.1, [0.5167, 2.1949]$	XIO-20

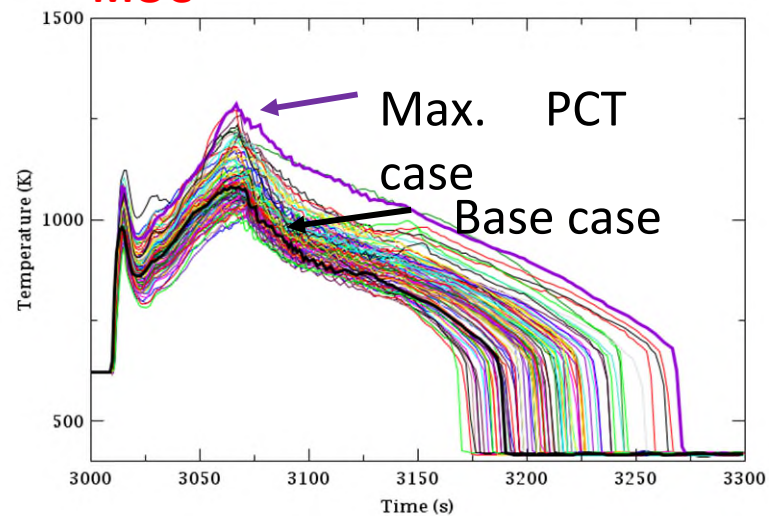
Tarea 6. Simulación de secuencias de LBLOCA en PWR con Monte Carlo

BOC



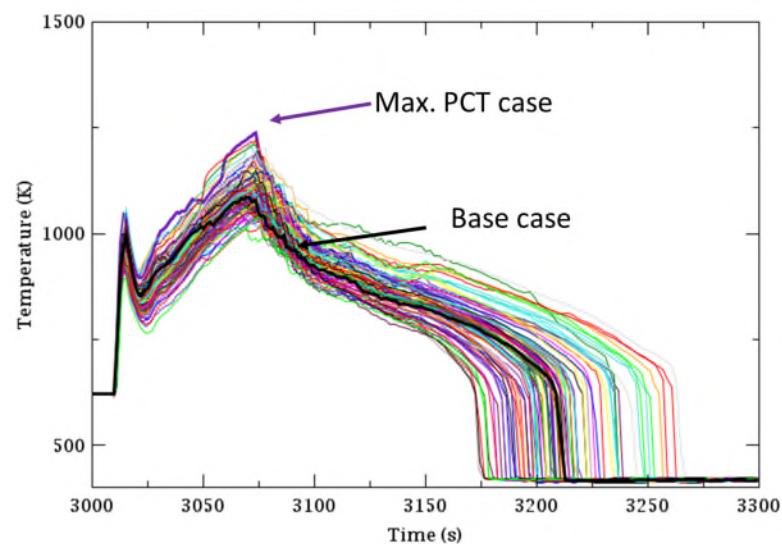
	Max. PCT (K)
BEPU-BOC	1401.3

MOC



	Max. PCT (K)
BEPU-MOC	1286.3

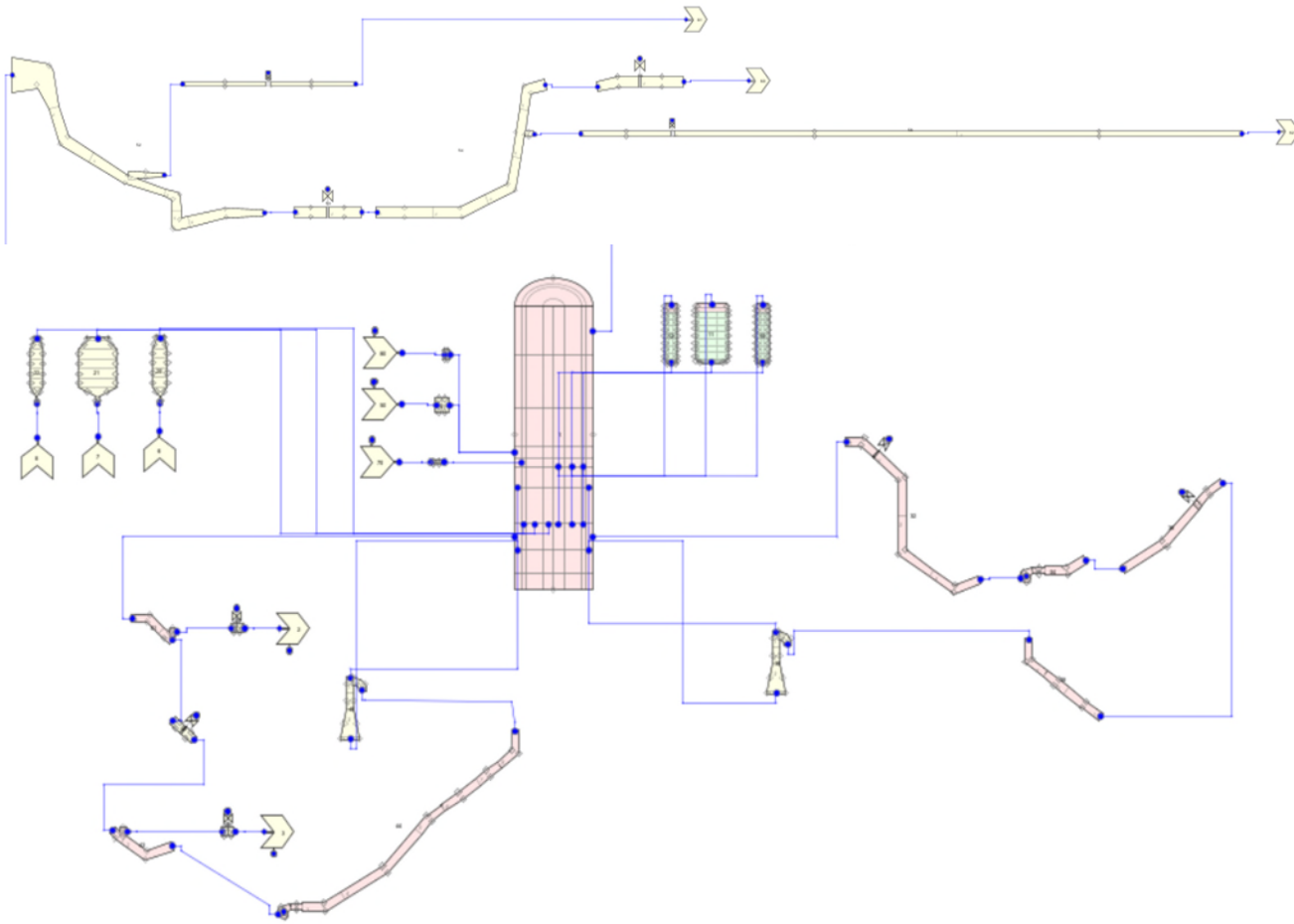
EOC



	Max. PCT (K)
BEPU-EOC	1238.2

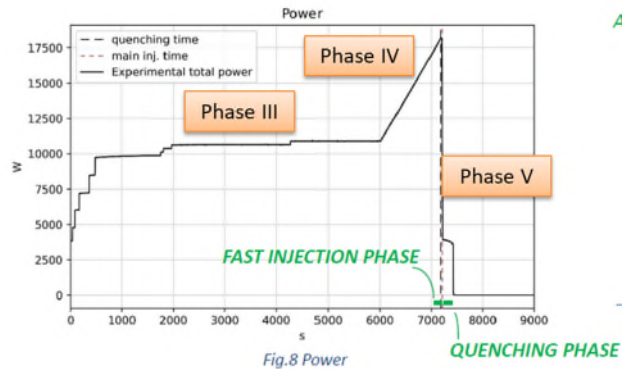
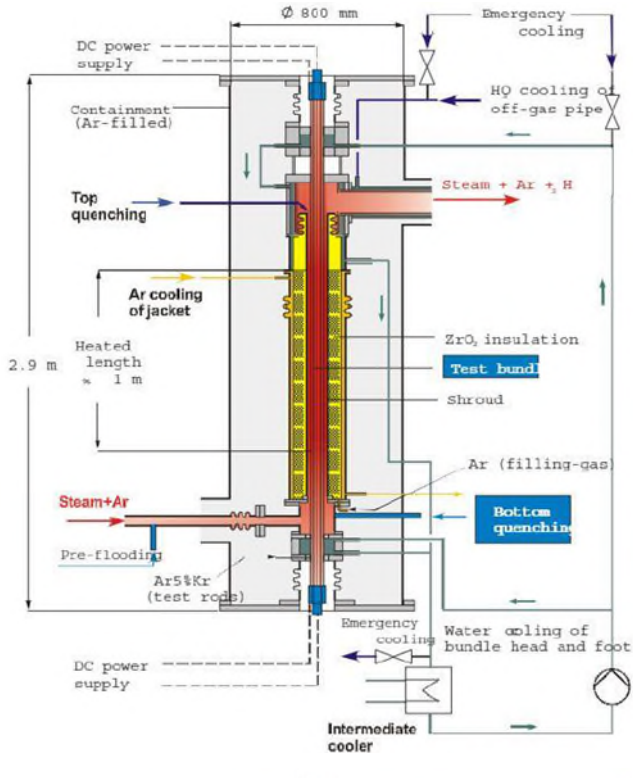
Tarea 7. Simulación de secuencias de LBLOCA en BWR con Monte Carlo

Modelo de BWR (código TRACE). UPV



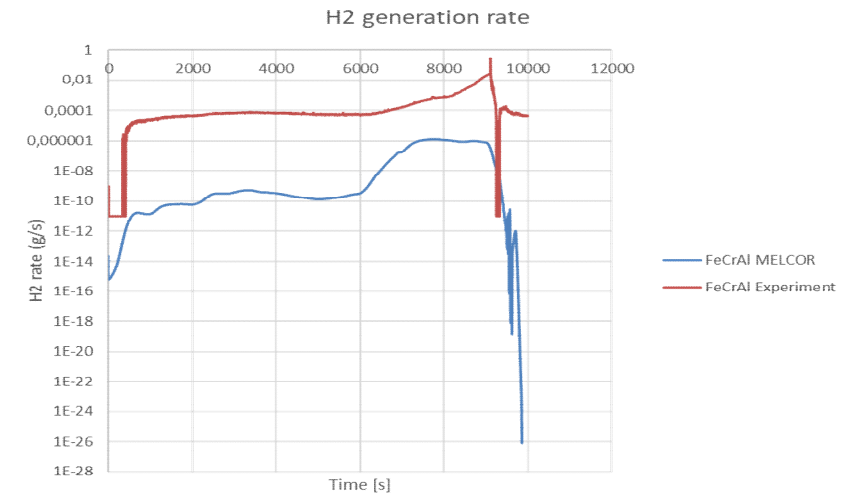
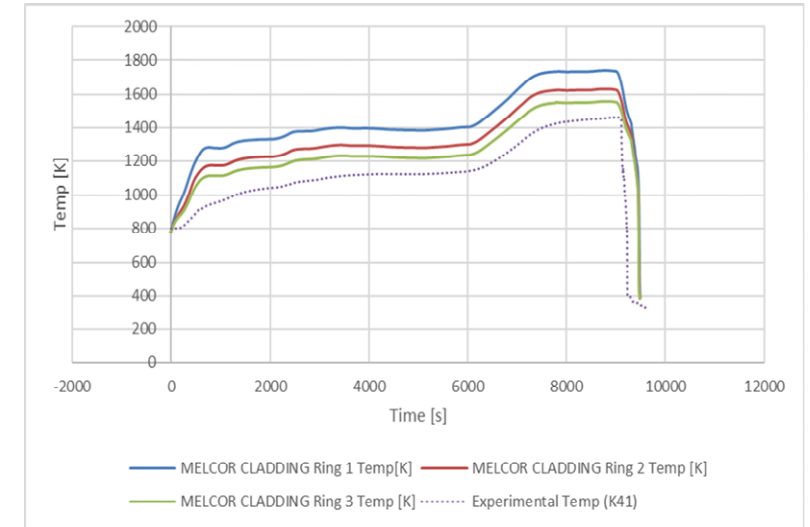
Tarea 8. Estudio del Accidente Severo en centrales con combustible ATF

Experimento QUENCH-19. FeCrAl. Código MELCOR

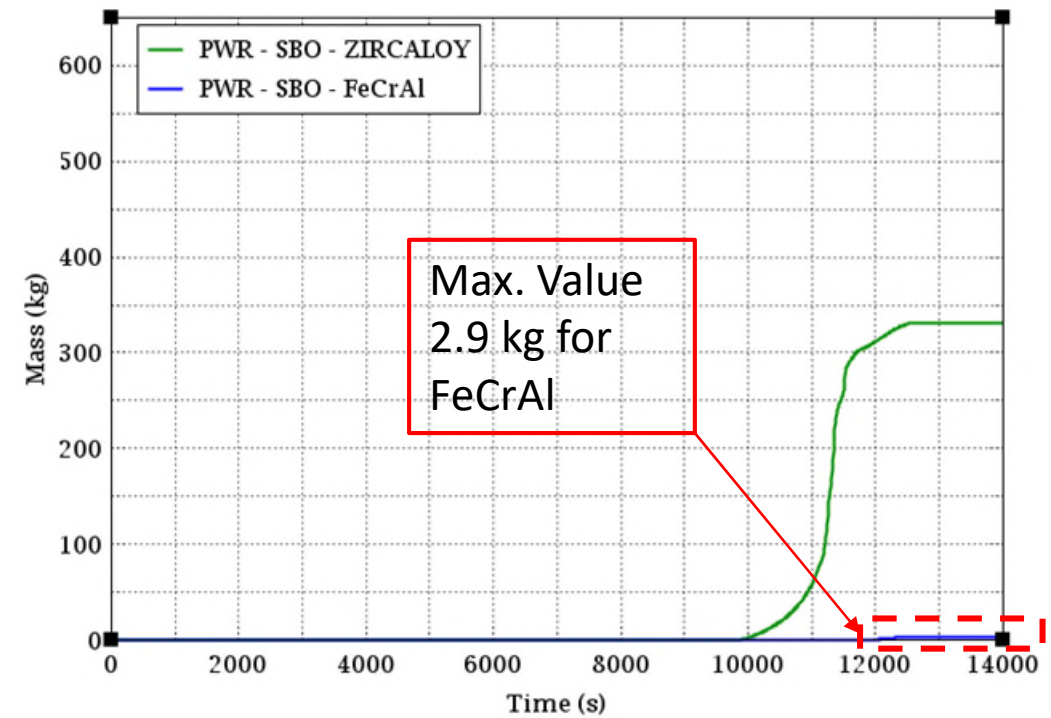
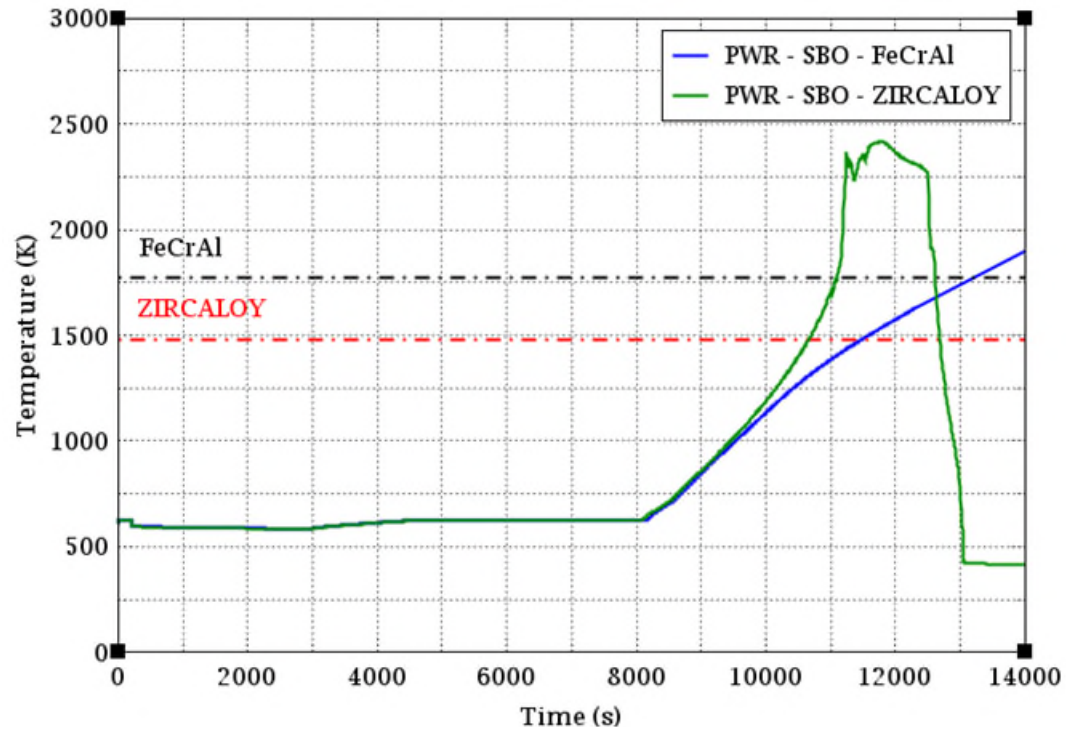


Nivel Axial	Volumenes de Control (CV)	
22	Sumidero Superior	CV150
21	Aislamiento Superior	CV130
20	Plenum Superior	CV126
19		CV125
18	Haz de Prueba	CV124
17		CV123
16		CV122
15		CV121
14		CV120
13		CV119
12		CV119
11		CV119
10		CV119
9		CV119
8	CV119	
7	CV119	
6	CV119	
5	CV119	
4	CV119	
3	CV119	
2	Plenum Inferior	CV119
1	Sumidero Inferior	CV50

Sección Calentada



PWR – STSBO – Fallo TDP-AFW t=0

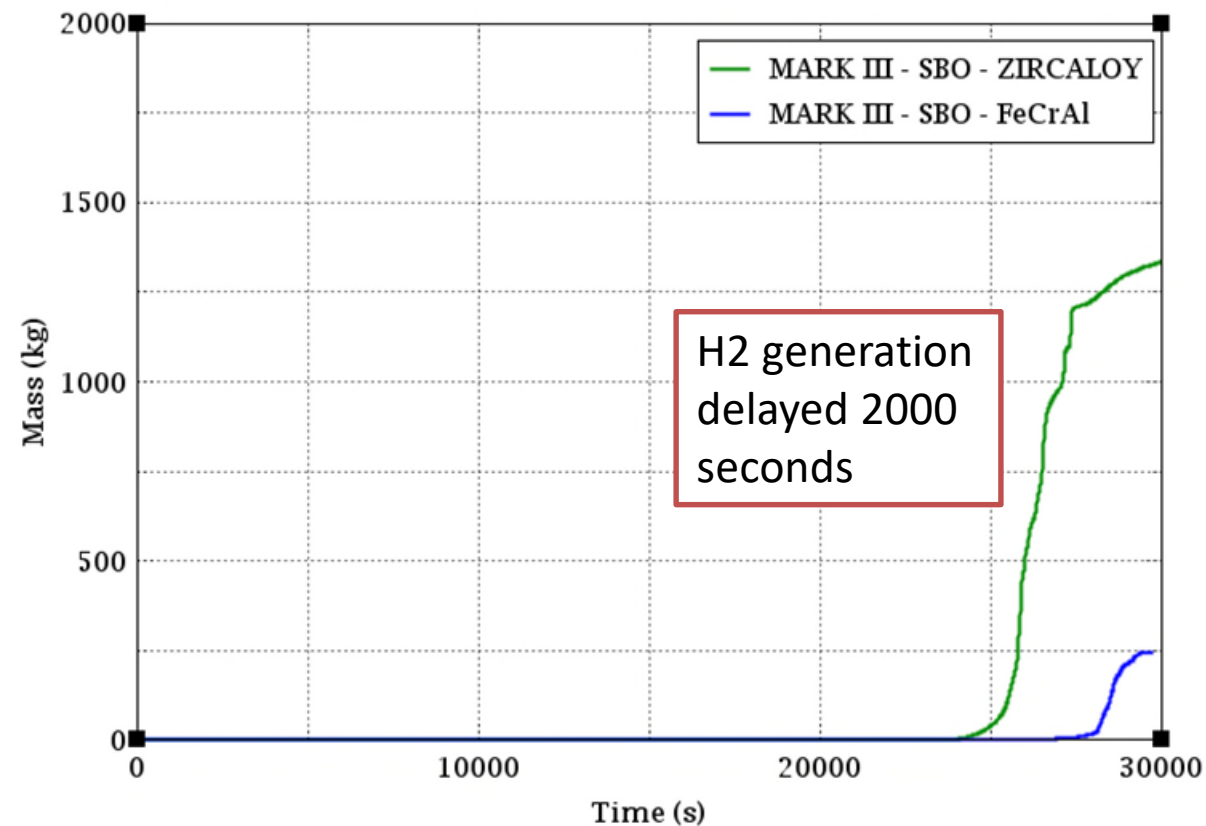
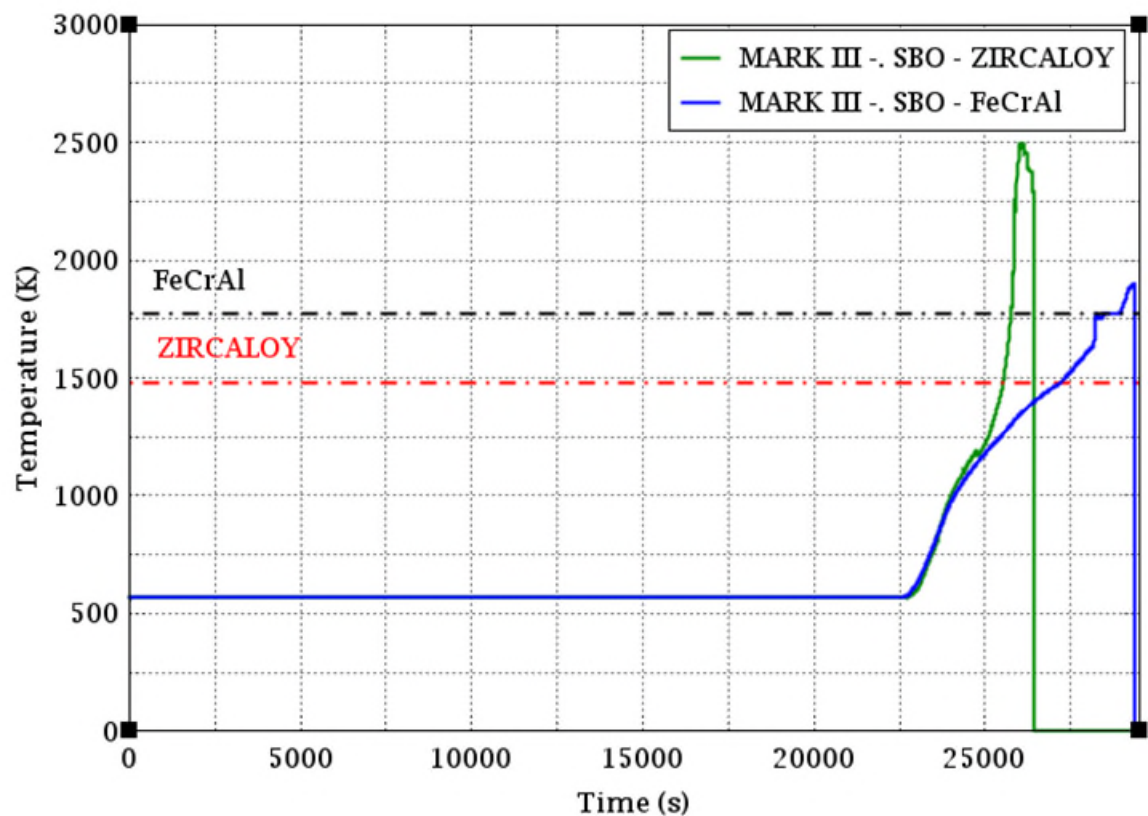


CD Time	CD Time ATF
10660 s	11460 s

Resultados similares a los obtenidos con TRACE

Accidente severo. MELCOR

BWR. SBO + 4 h RCIC



CD time	CD time ATF
25800 s	27780 s

Tarea 9. Divulgación: seminarios sobre ATF y termomecánica del combustible

1. **Descripción del combustible en reactores PWR/BWR.** César Qeral (UPM).
2. **Fenomenología termomecánica propia del periodo de irradiación.** Jorge Sanchez Torrijos (UPM).
3. **LOCA en PWR/BWR/KWU. Fenomenología termomecánica durante accidentes con pérdida de refrigerante.** Jorge Sanchez Torrijos (UPM).
4. **Criterios de aceptación LOCA.** César Qeral (UPM).
5. **Modelos termomecánicos incluidos en el código FRAPCON/FRAPTRAN/FAST.** Francisco Feria, Carlos Aguado, Pau Aragón (CIEMAT).
6. **Aplicaciones del código FALCON.** Roberto Plaza (IDOM).
7. **Modelos termomecánicos incluidos en el código TRANSURANUS.** Jorge Sanchez Torrijos (UPM).
8. **Pin-level multiphysics analysis of Light Water Reactors using TRANSURANUS coupled to Serpent and SUBCHANFLOW.** Manuel García. Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
9. **Modelos termomecánicos incluidos en el código de sistemas TRACE. Fase de irradiación. Propiedades de los materiales.** Jorge Sanchez Torrijos (UPM).
10. **Modelos termomecánicos incluidos en el código de sistemas TRACE. Secuencias de LOCA.** Jorge Sanchez Torrijos (UPM).
11. **SCDAP/RELAP5 y RELAP5.** Raimon Pericas (ENSO).
12. **INTRODUCTION TO ATF CONCEPTS. APPLICATION TO MELCOR ANALYSIS.** Kevin Fernandez-Cosials (UPM).
13. **ACCIDENT-TOLERANT FUELS.** Pau Aragón (CIEMAT).

A review on the thermo-mechanical modelling needs in system codes

Nuclear Engineering and Design 2023

Jorge Sanchez-Torrijos^a, Pau Aragón^b, Cesar Queral^a, Francisco Fera^b, Arndt Schubert^c, Paul Van Uffelen^c

^a *Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, Spain*

^b *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid, Spain*

^c *European Commission, Joint Research Centre (JRC), Karlsruhe, Germany*

Risk-Informed Analysis of the Application of Accident Tolerant Fuels in the SPAR-CSN Probabilistic Safety Assessment Model

18th International Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2023)

July 15–20, 2023. Knoxville, TN, USA.

César Queral Salazar¹, Sergio Courtin¹, Jorge Sánchez Torrijos¹, Alberto García-Herranz¹, Julia Herrero-Otero¹

¹*Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, Spain*

Agradecimientos al CSN

¿Alguna pregunta?