Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible tolerante a accidentes (ATF)

Jornada I+D+i

Proyectos de Investigación en SEGURIDAD NUCLEAR

MADRID, 11 DE JUNIO DE 2026

César Queral, PhD
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

cesar.queral@upm.es

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

Participantes

- **IP: César Queral (UPM)**
- **Oscar Cabellos de Francisco (UPM)**
- **Kevin Fernandez Cosials (UPM)**
- **Emilio Castro Gonzalez (UPM)**
- **Rafael Miro Herrero (UPV)**
- **Teresa Barrachina Celda (UPV)**
- **Bárbara Navarro Mas (UPV)**
- Javier Gómez Magán (UPM à QUASAR)
- Jorge Sánchez Torrijos (UPM à NFQ)
- Sergio Courtin Vega (UPM à EAG)
- David Canal (UPM à Meitner Energy)
- Elena Redondo Valero (UPM à EAG)
- Yago Martinez Gonzalez (UPM à WEC)
- Jorge Bravo Calonge (UPM à EAG)
- Rodrigo Rivilla Gallego (UPM à WEC)
- Victor Garcia-Zarco (UPM)

Coordinador Técnico (CSN): Miguel Sánchez Perea

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

CAMP – CSN – NRC
TRACE
PWR - BWR

CSARP – CSN – NRC
MELCOR
PWR - BWR

SPAR – CSN
RiskSpectrum (RS)
PWR

TU User Group
TRANSURANUS
Modelos de barra

ISASMORE MCIU
TRACE
CAREM VVER-1000

ATF – CSN
TRACE TU MELCOR RS
PWR BWR VVER
NuScale

H2020 McSAFER
TRACE PARCS
NuScale

CRP IAEA ATF-TS
UPM – NFQ
TRACE TU MELCOR
PWR IFA QUENCH

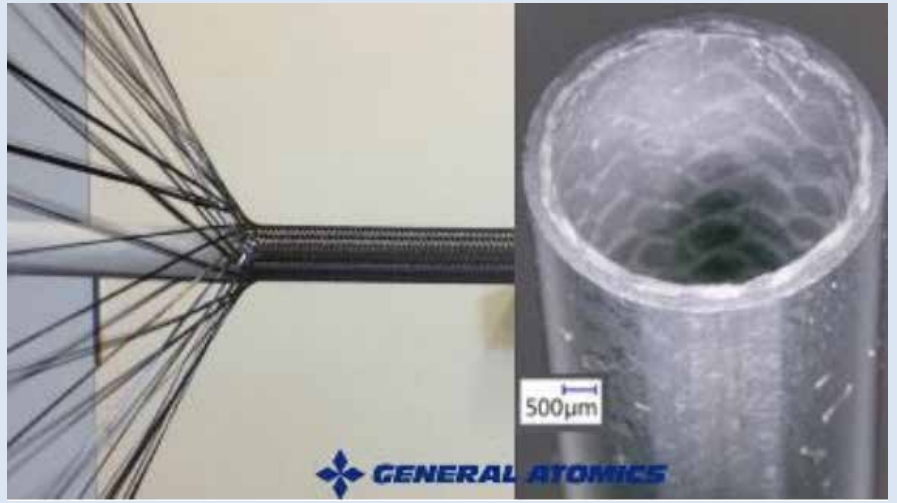
Grupo CEIDEN - ATF
Grupo CEIDEN - SMRs

I-NERI Project
BNL– INL–UPM–NFQ
TRACE – TU – BISON
NuScale

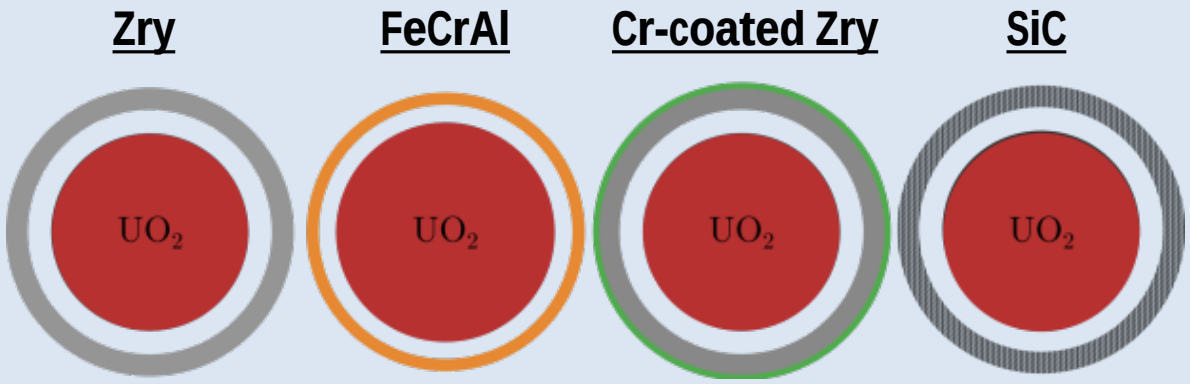
Clasificación de los ATFs

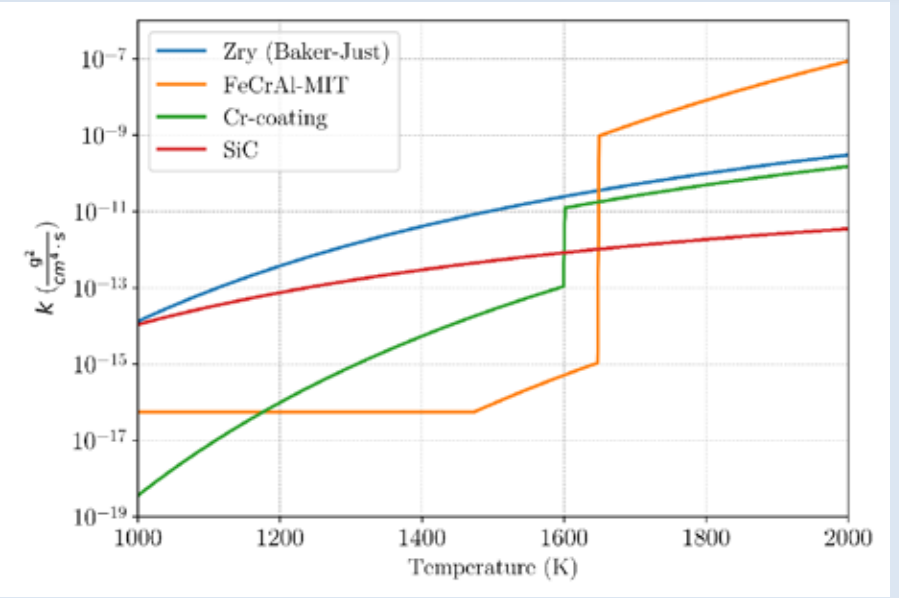
ATF	CLADDINGS	FUELS
EVOLUTIONARY (Near-term)	• **Coated Zry cladding** (Cr-Zry) • Advanced steels (e.g. **FeCrAl**)	• Doped UO_2 (e.g Cr_2O_3) • High Thermal Conductivity UO_2 • Dual-cooled fuel
REVOLUTIONARY (Long-Term)	• Lined Mo-alloy • **SiC Composite**	• High density fuels [UN] ,[U_3Si_2] • TRISO-SiC composite pellets





Criterios de aceptación de las vainas ATF

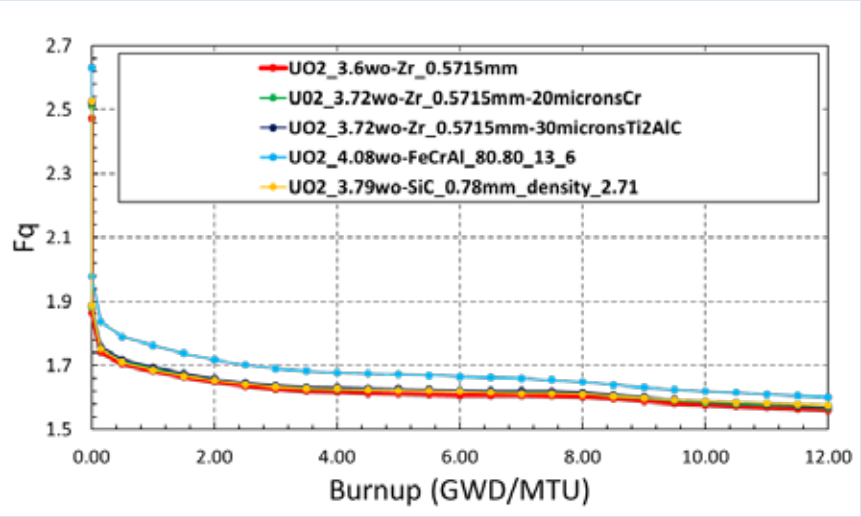




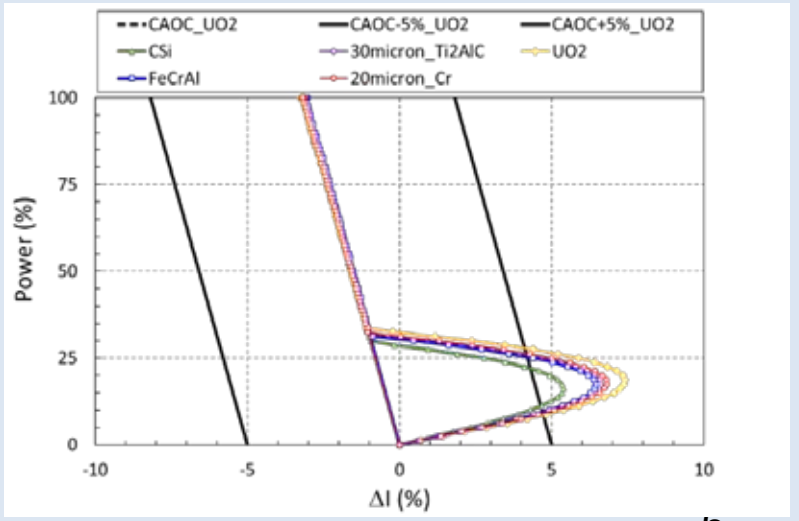
	PCT		ECR
Zry	1477 K		17%
Cr-coated Zry	1477 K	1605 K **Eutectic Cr-Zr temperature**	17% (burst) *Experimental tests show different ECR limits below and above 17% depending on the base cladding material*
FeCrAl	1477 K	1773 K **Melting temperature**	*FeCrAl is not affected by embrittlement due to hydrides and oxides (NEA-2022 ?) – new limit (?) –* ***new experimental tests***
SiC	1973 K **Decomposition and sublimation limits**		*SiC failure mechanisms are also not related to oxidation*

Actividades Realizadas.
Simulación de secuencias de seguimiento de carga en PWR

- Obtención de las **secciones eficaces** de los distintos materiales (**recubrimiento de Cr, FeCrAl, SiC**)
- Aplicado a un PWR-W en el modelo disponible en el sistema **SEANAP** (ETSII – UPM)
- El combustible ATF se ha considerado solo en el combustible nuevo de un ciclo, con ajuste del enriquecimiento
- Los resultados muestran que el **Cr-Zry** tiene un comportamiento muy próximo al combustible convencional.
- El **FeCrAl** presenta una **penalización neutrónica** significativa debido a su absorción neutrónica. Requiere un Δ%U-235 ≈ **+0,33 w/o**, coeficientes de reactividad menos negativos y menor valor de los bancos de control, lo que puede reducir ligeramente los márgenes neutrónicos.
- Desde el punto de vista operacional, las **maniobras de parada y retorno a potencia** pueden realizarse **de forma similar a las del combustible convencional**, cumpliendo las ETFs. No obstante, el **FeCrAl** presenta cierta ventaja operativa al reducir las necesidades de boración/dilución en este tipo de maniobras.

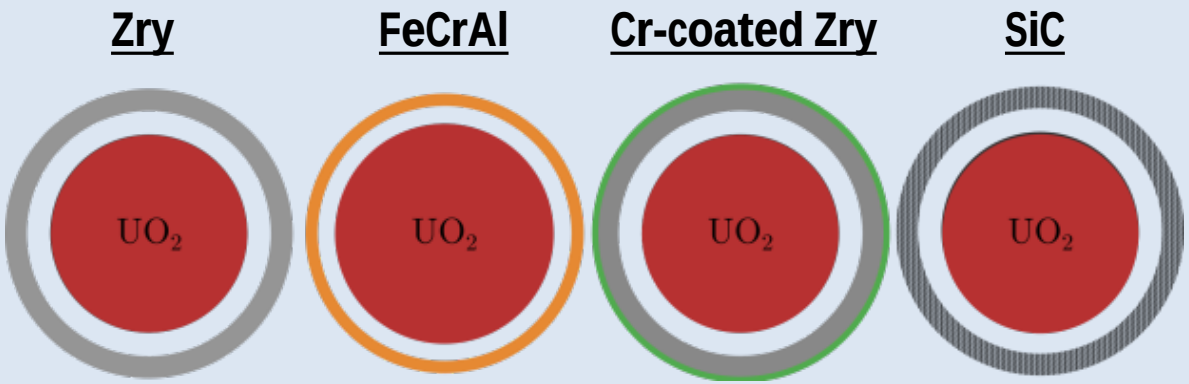


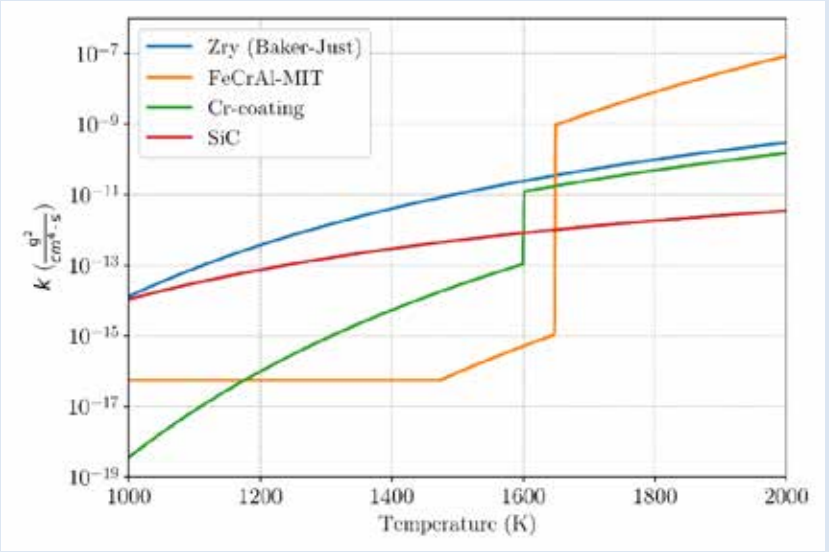
Maniobra de retorno a potencia (5 %/h) tras una parada de 9 h al final de ciclo con vainas ATF.



Actividades Realizadas.
Incorporación de modelos ATF en TRACE

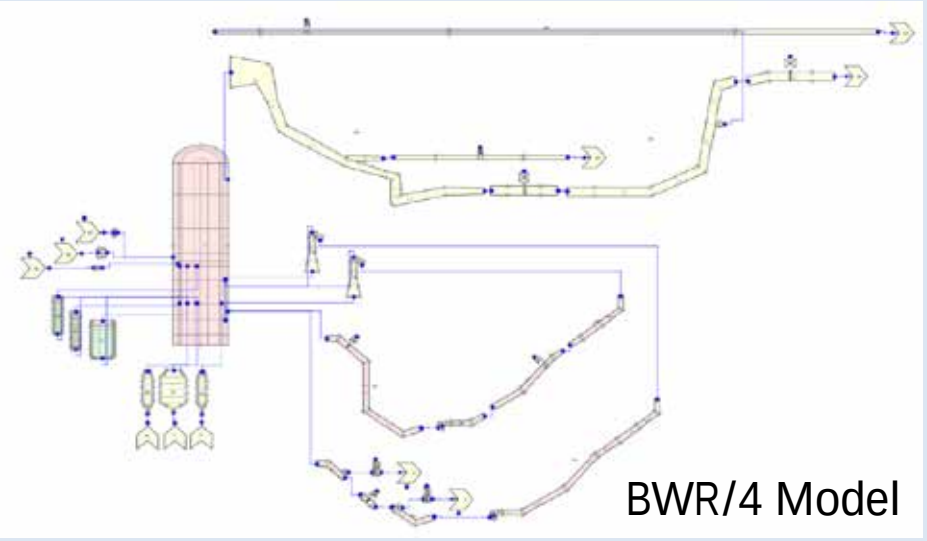
- **Zry**. Cladding thickness: **570 µm**
- **FeCrAl**. Properties and models were incorporated in an **in-house version of the TRACE code**: **density**, **oxidation rate**, **Young modulus**, **high-temperature creep strain**, **Poison's ratio**, **burst stress criterion**, **yield stress**, **ultimate tensile strength**, **thermal expansion coefficient** and **thermal conductivity**. Cladding thickness: **385 µm**
- **Cr-coated Zry**. The capability of TRACE to consider **multiple cladding materials** was considered. The **thickness of the Cr layer is 25 µm** and it is hypothesized that, in general, Cr-coated Zry cladding would exhibit a similar behavior to bare Zry cladding. **Only strain/burst models has been modified**.
- **SiC**. This cladding material is included in TRACE5 patch9. **There is no ballooning or burst in SiC**.



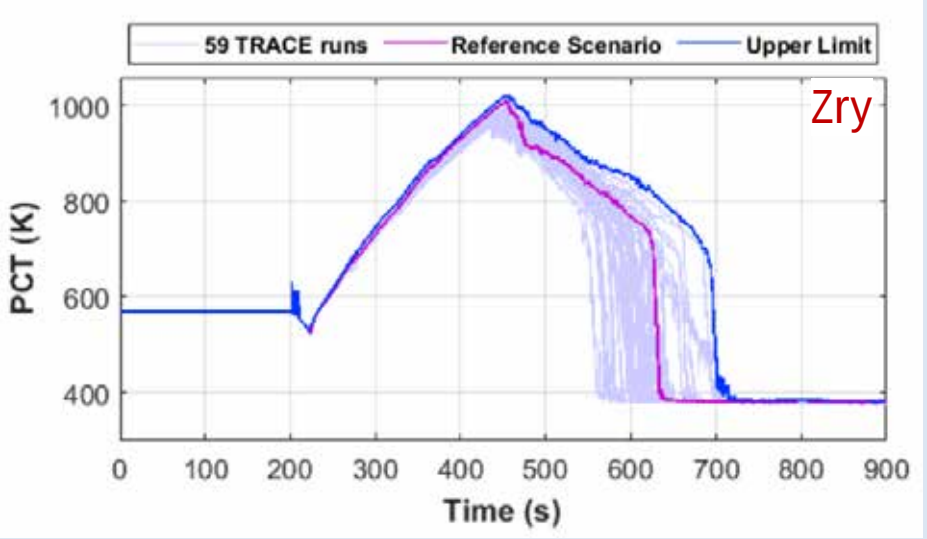


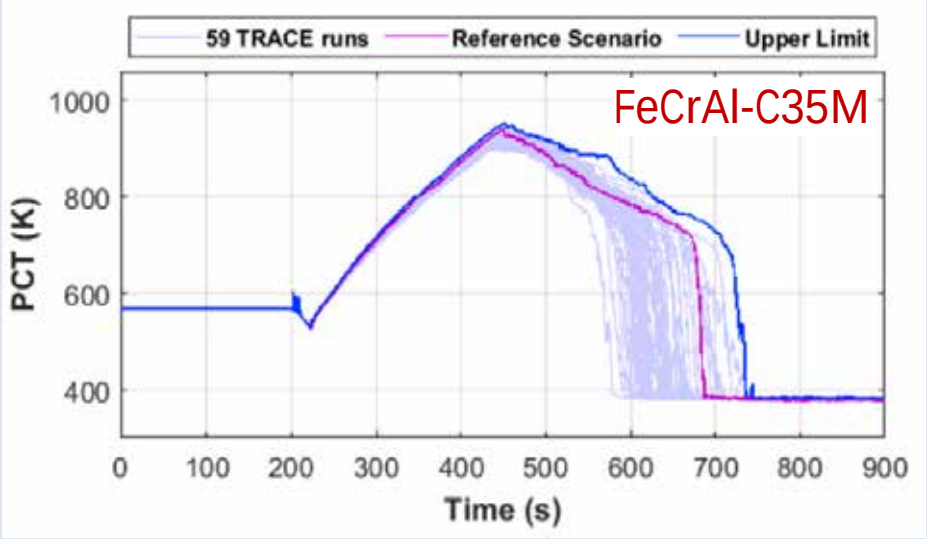
Parabolic oxidation rate

Actividades Realizadas.
Secuencias de LBLOCA en BWR (UPV)


BWR/4 Model

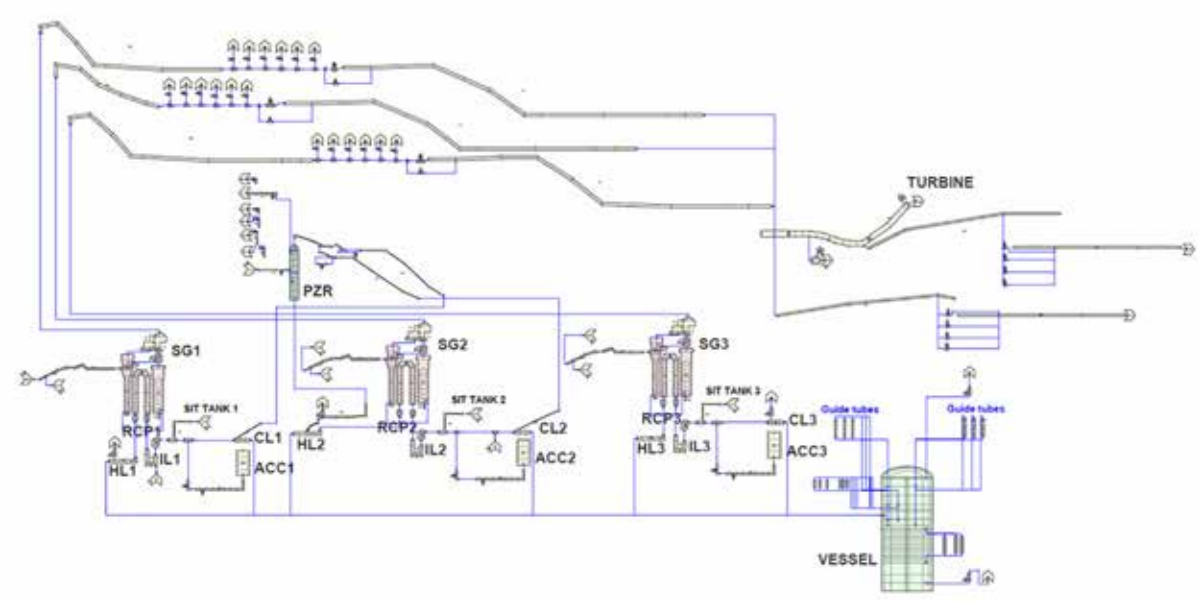
- Under LBLOCA conditions, **FeCrAl**-C35M cladding exhibits a lower peak temperature rise (**ΔPCT≈ 60 K**), a slower cooling rate, and a delayed quenching temperature compared with Zircaloy, indicating an **improved heat removal capability**.
- The **Sobol indices** complement the **PRCC results** from Wilks analysis by revealing not only the direct influence of each parameter through the first-order index, but also their **combined interaction effects**, captured by the total-effect index.



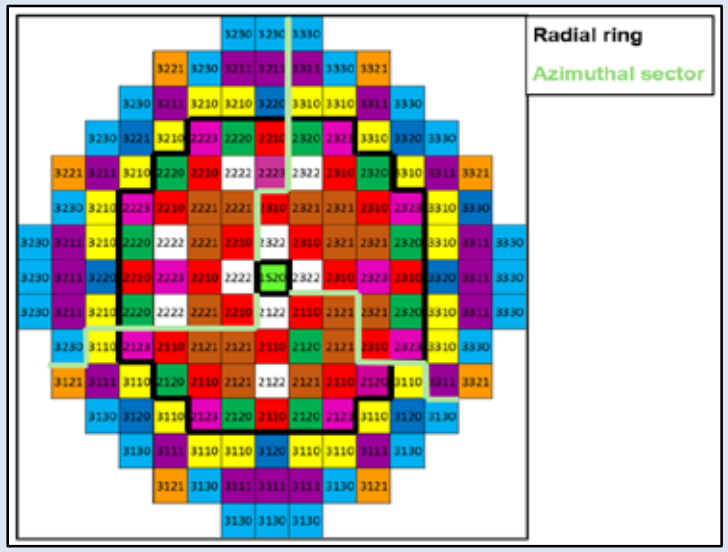


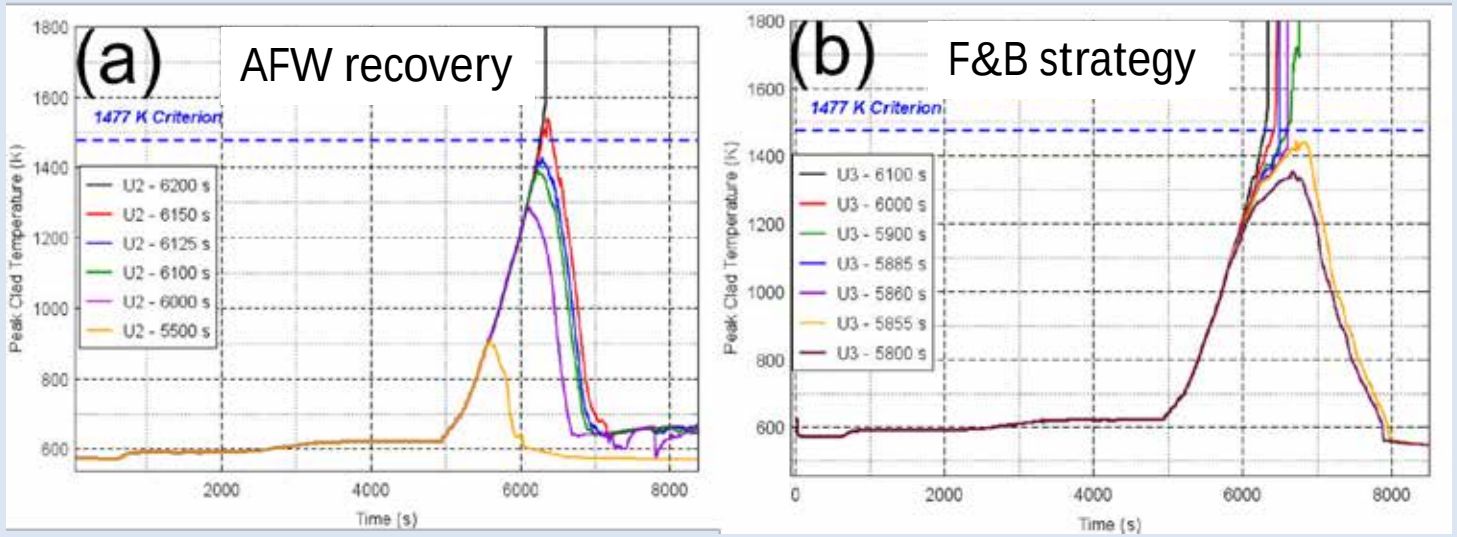
B. Navarro, T. Barrachina, R. Miró, G. Verdú, J.C. García-Díaz. **U&S analyses in a BWR NPP LB-LOCA transient with ATF**. Nuclear Engineering and Design, Volume 446, Part A, **2026**.

Actividades Realizadas.
Secuencias de TLFW en PWR

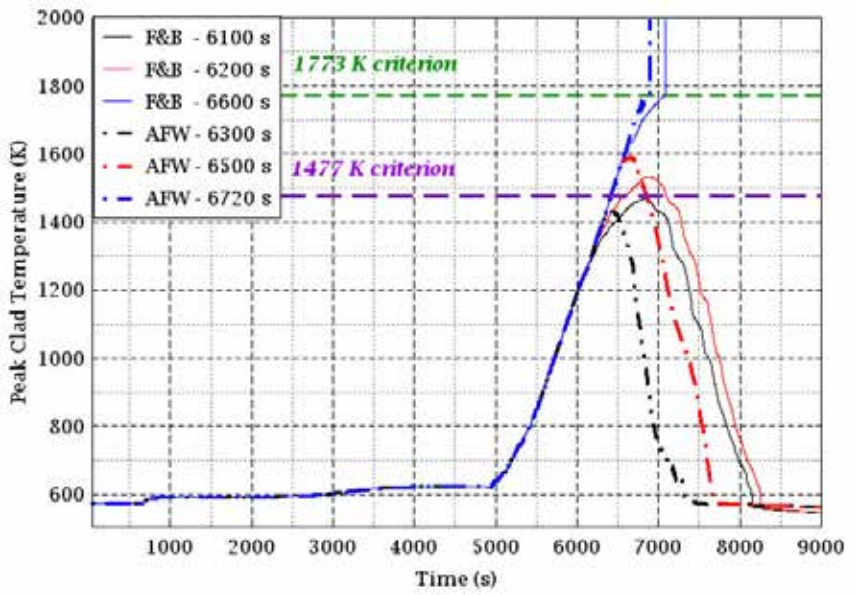


Total loss of Feed Water	Reactor trip	AFW recovery	Feed & Bleed	H. P. Recirc.		
TLFW	Z	A	F	HPR	Seq	State
					1	Success
					2	Success
					3	Damage
					4	Damage
					5	ATWS

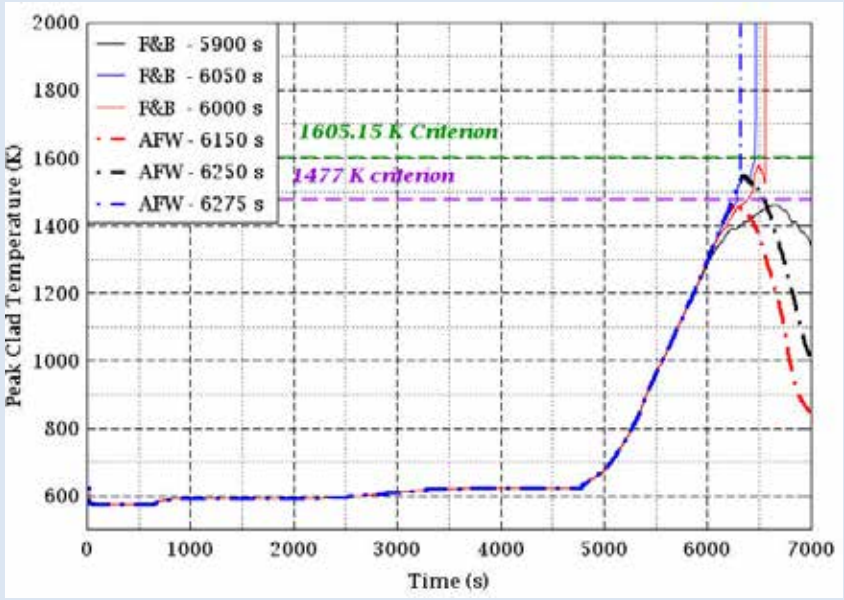




Actividades Realizadas.
Secuencias de TLFW en PWR



FeCrAl cladding



Cr-coated Zry cladding

Cladding Type	t_{A1} (min)	t_{A2} (min)	Δt_{A1} (min)	Δt_{A2} (min)
Opt. Zirlo	97.5	-	-	-
Cr- coated Zry	98.3	100.0	0.8	2.5
FeCrAl	101.7	106.6	4.2	9.1

Time available with **F&B strategy** for different types of cladding

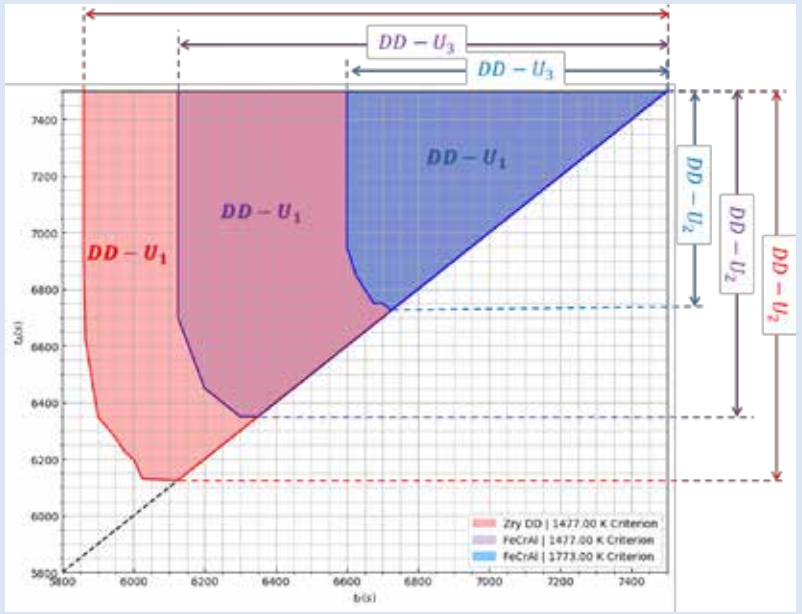
Cladding Type	t_{A1} (min)	t_{A2} (min)	Δt_{A1} (min)	Δt_{A2} (min)
Opt. Zirlo	100.0	-	-	-
Cr- coated Zry	102.5	104.2	2.5	4.2
FeCrAl	105.0	111.7	5.0	11.7

Time available with **AFW recovery** for different types of cladding

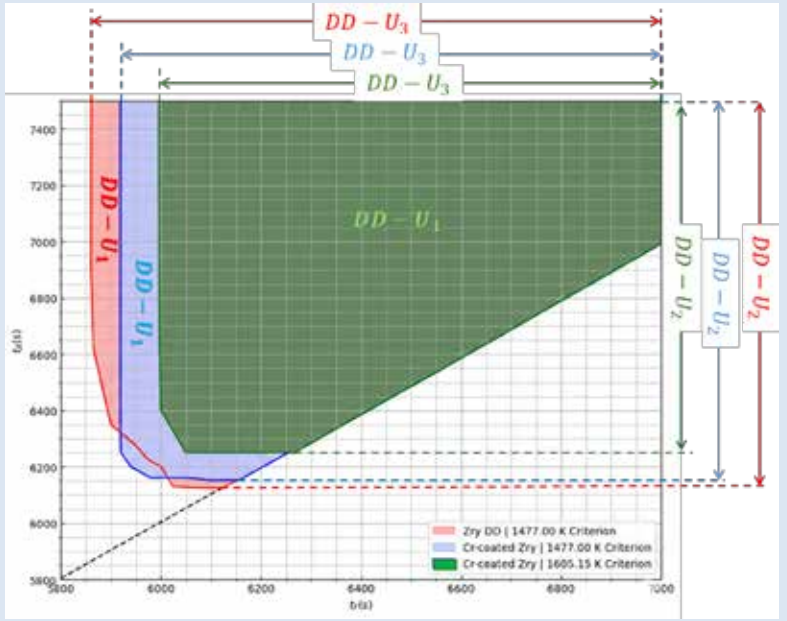
Actividades Realizadas.
Secuencias de TLFW en PWR

ISA Approach

- CSN – UPM – NFQ
- DPSA: PSA + DSA
- J.M. Izquierdo et al



Damage Domain for different FeCrAl acceptance criteria

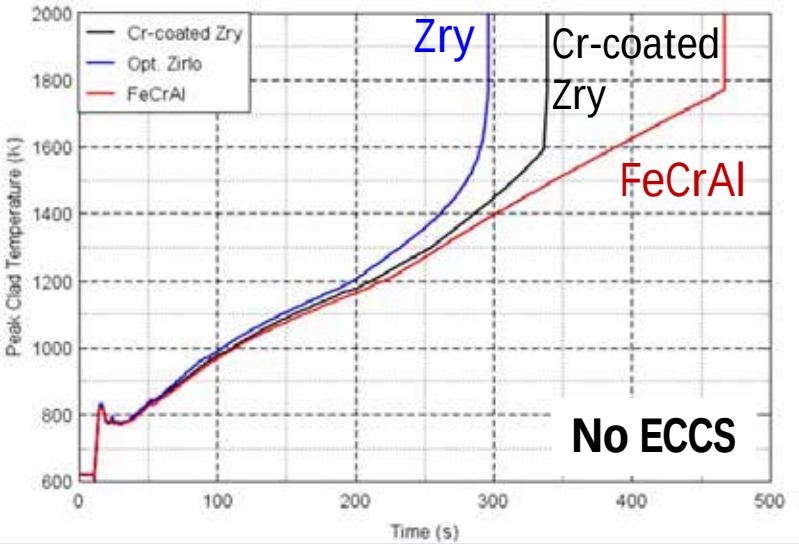


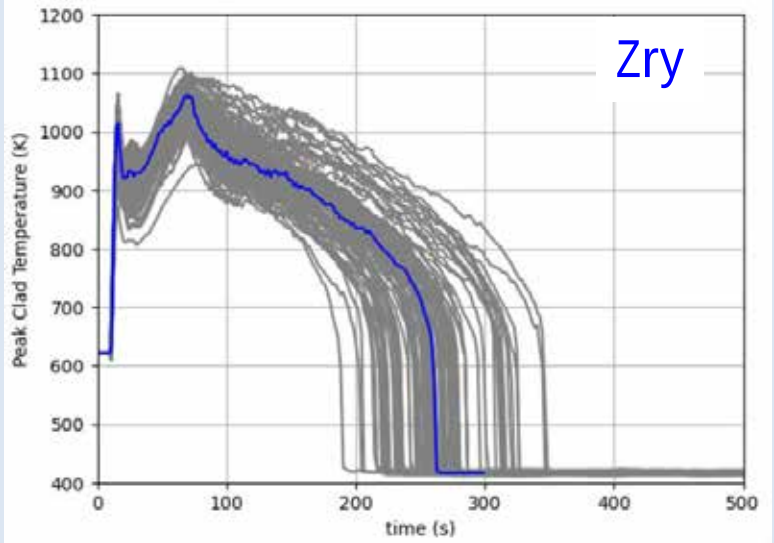
Damage Domain for different Cr-coated Zry acceptance criteria

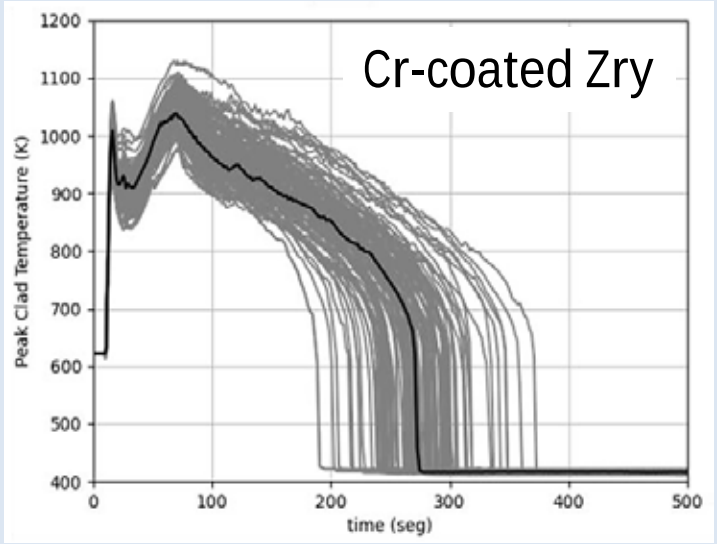
Cladding material	Acceptance criterion	DEP	DEF (1/y)	ΔDEF (%)
Opt. Zirlo	1477 K	7.14E-04	1.43E-07	-
Cr coated Zry	1477 K	6.95E-04	1.39E-07	3%
	1605.15 K	6.66E-04	1.33E-07	7%
FeCrAl	1477 K	6.38E-04	1.28E-07	10%
	1773 K	5.26E-04	1.05E-07	27%

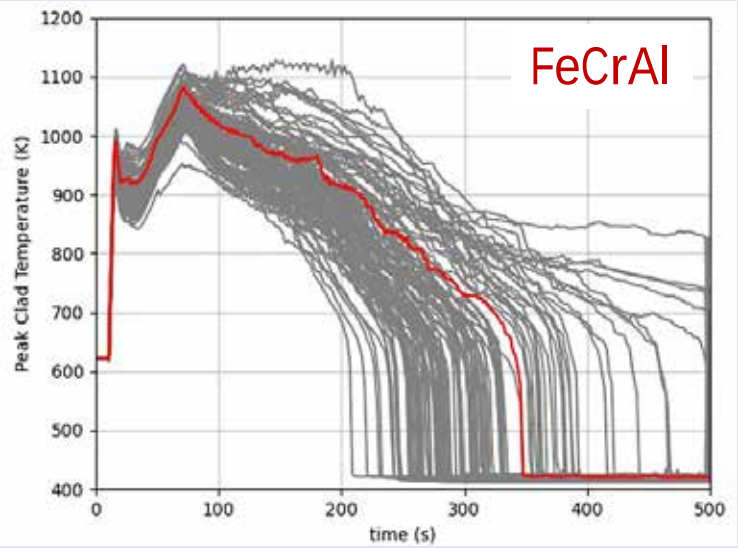
David Canal, César Queral, Javier Magán, Emilio Castro-González, Jorge Sánchez-Torrijos.
"**Quantification of the risk reduction due to the implementation of ATF claddings in Total Loss Feed Water sequences**". Nuclear Engineering and Design **2026**

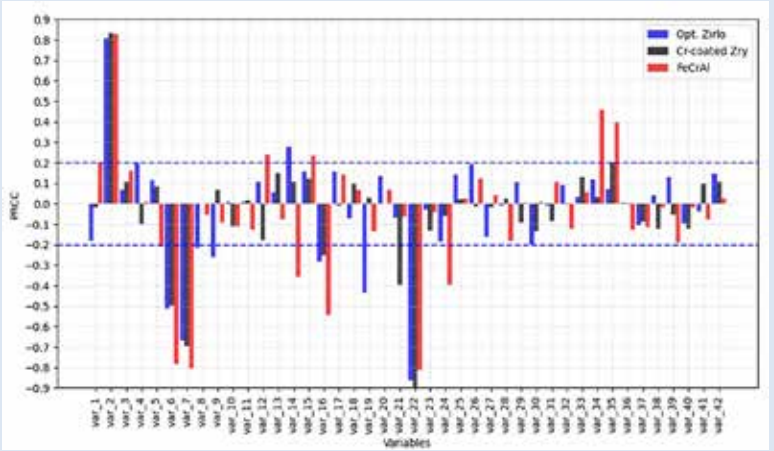
Actividades Realizadas.
Secuencias de LBLOCA en PWR



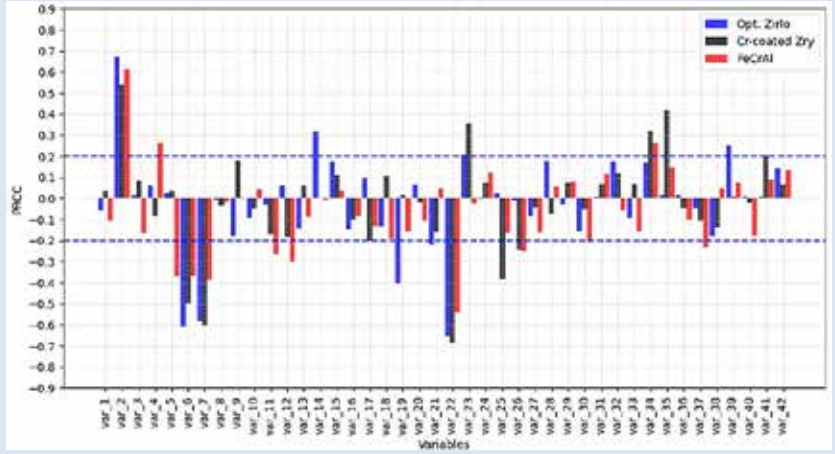






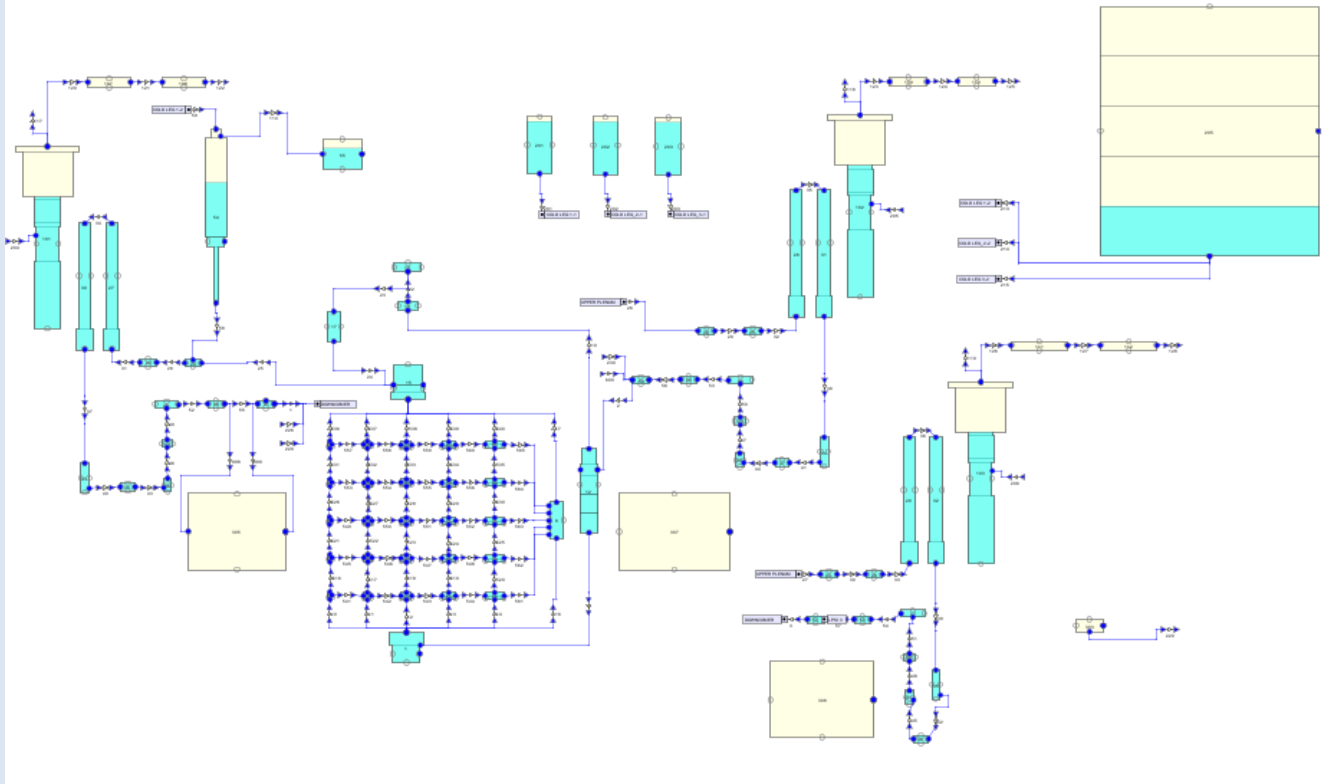


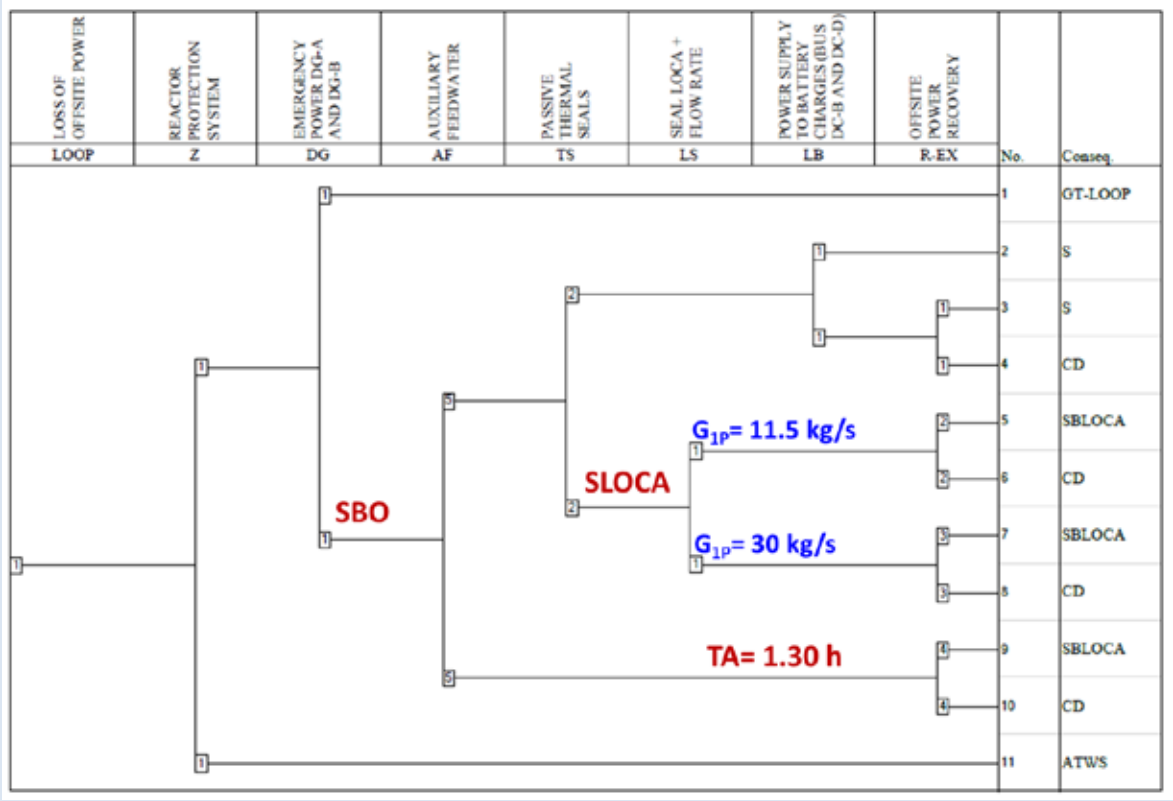
PRCC PCT Blowdown



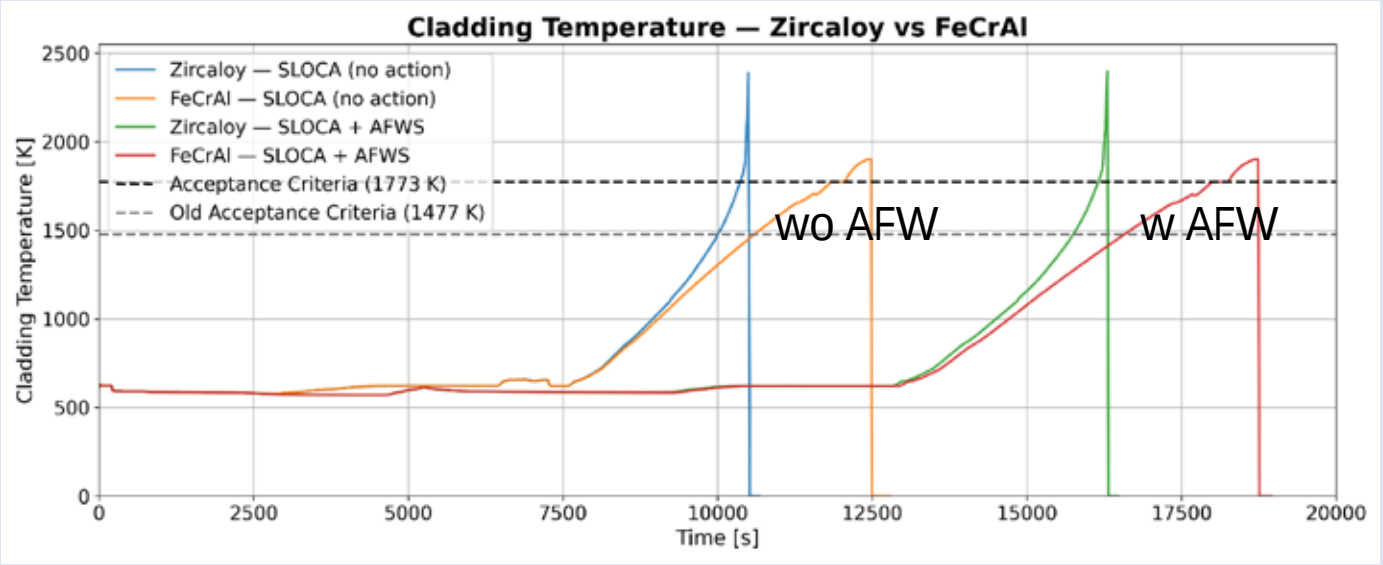
PRCC PCT Reflood

Actividades Realizadas.
Secuencias de SBO en PWR (MELCOR)

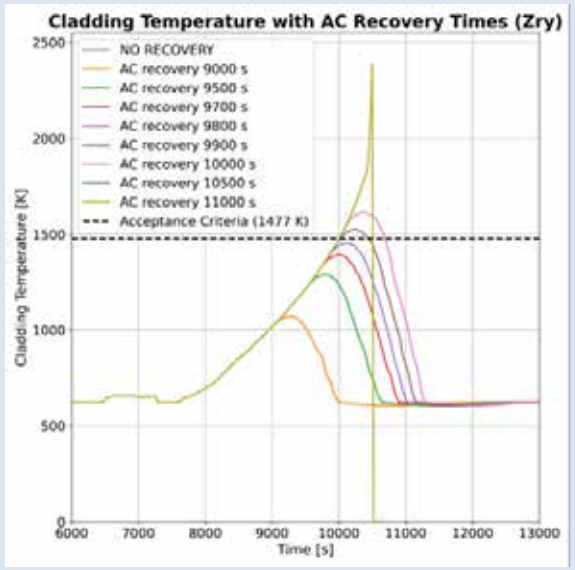


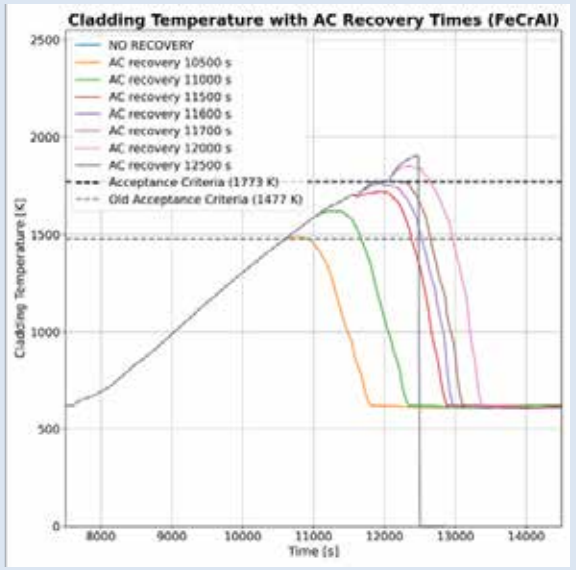


Actividades Realizadas.
Secuencias de SBO en PWR (MELCOR)



SBO + w/wo AFW + SLOCA (G_{1P} = 11.5 kg/s)



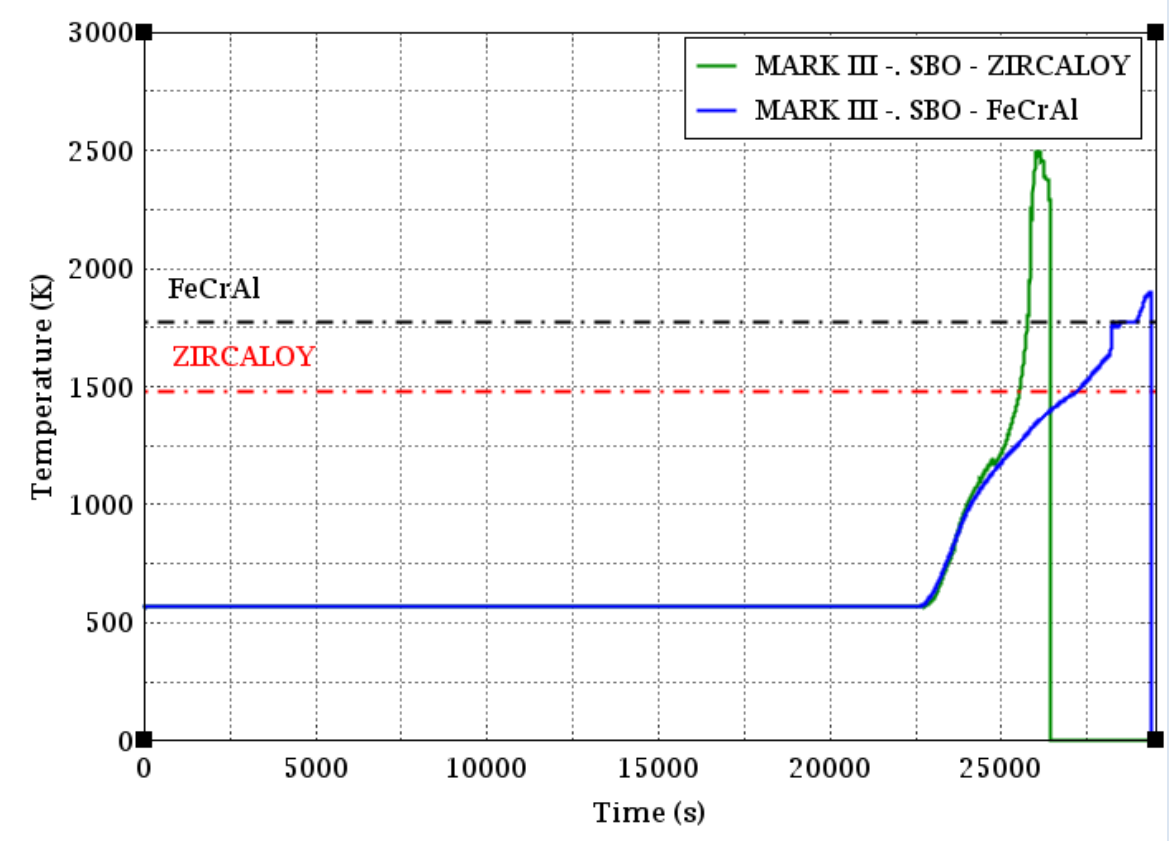


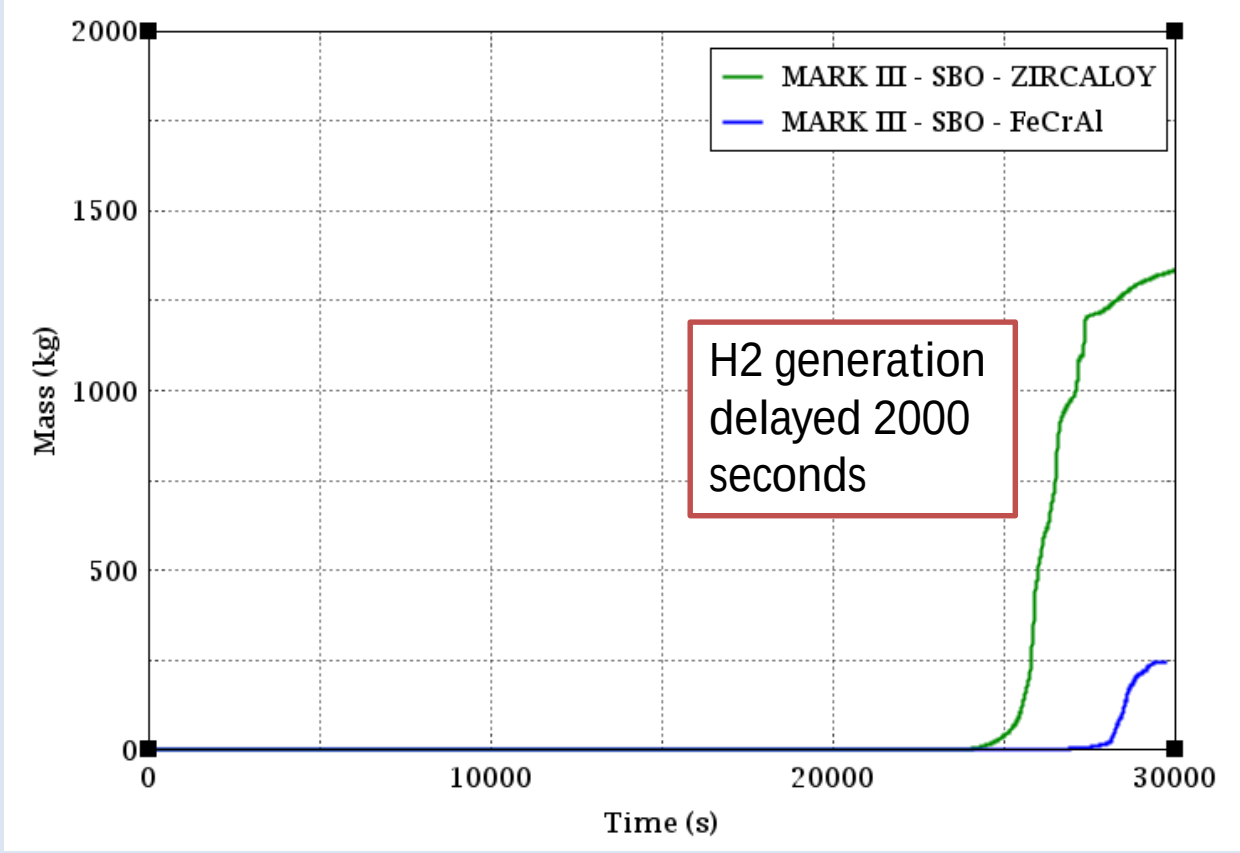
SBO + wo AFW + SLOCA (G_{1P} = 11.5 kg/s)

	SBO+SLOCA (w/o AFWS)	SBO+SLOCA (w AFWS)
Zry	10,020 s	15,760 s
FeCrAl (1477 K)	10,600 s	16,580 s
FeCrAl (1773 K)	11,840 s	18,000 s

También se han realizado diversos análisis con TRACE para Cr-coated Zry y FeCrAl

Actividades Realizadas.
Secuencias de SBO en BWR (MELCOR)





CD time	CD time FeCrAl
25800 s	27780 s (**8%**)

Accidente Severo con ATF (MELCOR)



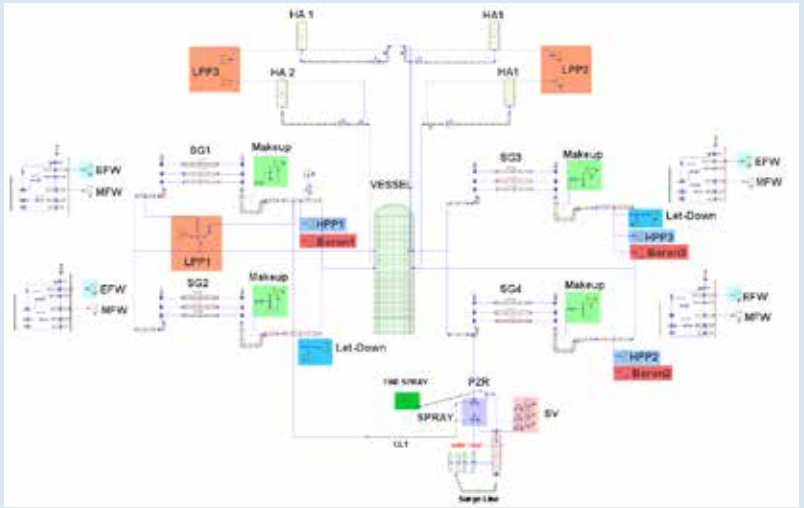
Evaluation of Accident Tolerant Fuel using MELCOR2.2 on Representative Accident Sequences in Typical Japanese PWR

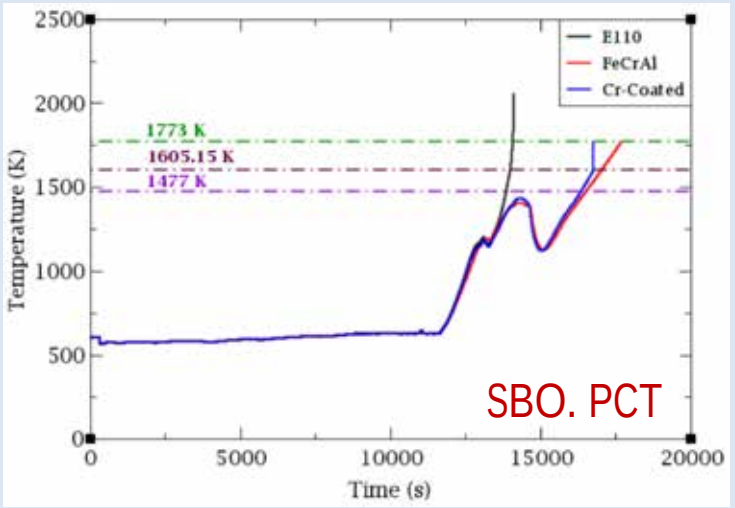
NRA, **Masashi SEKINE**, Junichi KANEKO, Wataru KIKUCHI, Retsu KOJO

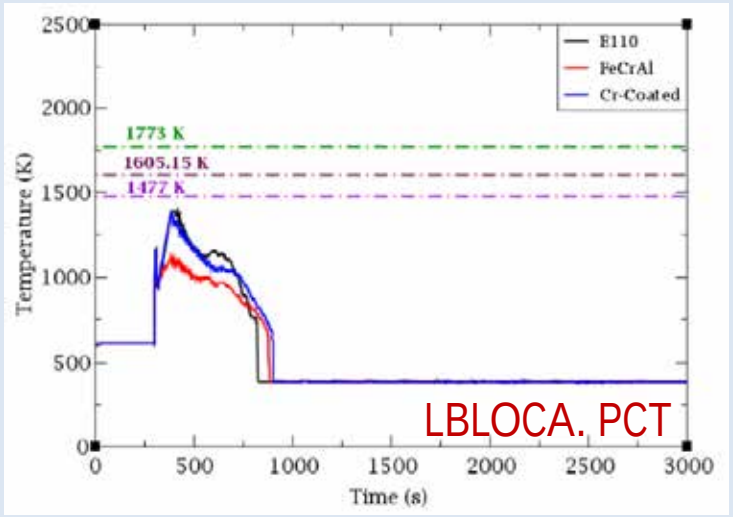
SBO	Zircaloy	Cr-coating	FeCrAl-ORNL	FeCrAl-MIT	SiC
PCT [K]	2,497	2,499	1,804	1,901	2,900
Lower head failure timing [hr]	6.5	7.8	7.4	7.0	8.0
H^2 mass [kg]	541	603	490	558	611

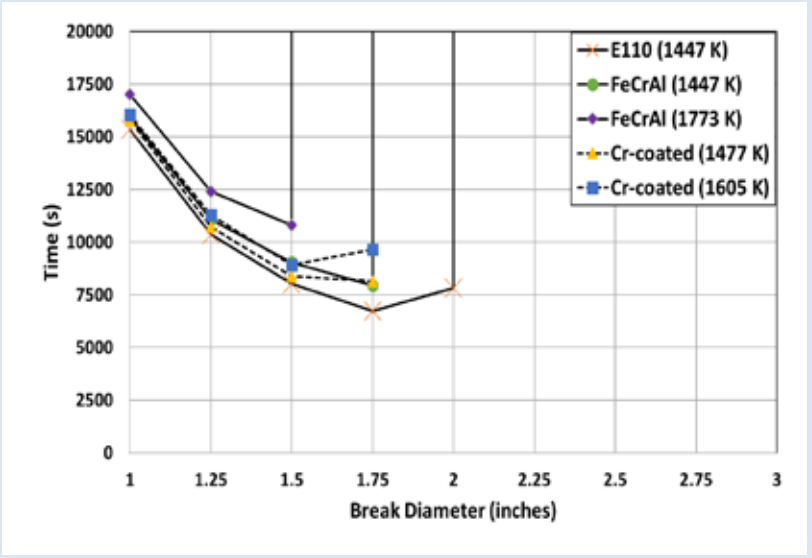
LOCA	Zircaloy	Cr-coating	FeCrAl-ORNL	FeCrAl-MIT	SiC
PCT [K]	2,497	2,499	1,804	1,901	2,900
Lower head failure timing [hr]	2.5	2.5	2.6	2.6	3.0
H^2 mass [kg]	343	301	347	400	450

Actividades Realizadas.
Proyecto ISASMORE: Secuencias accidentales en VVER con ATF

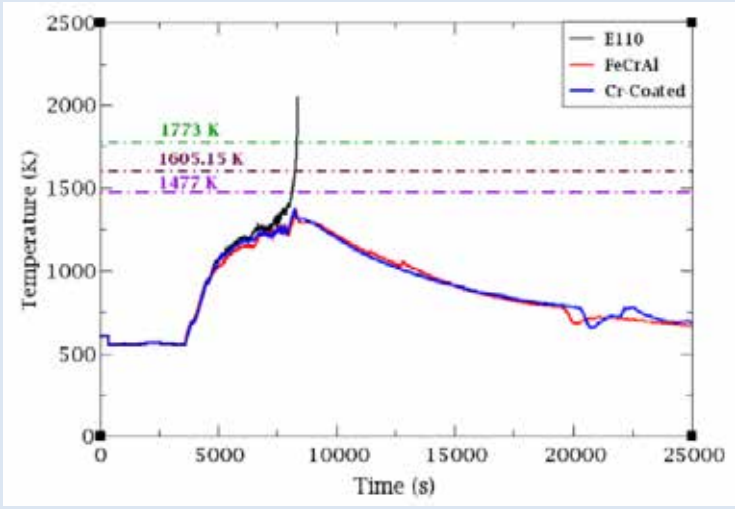




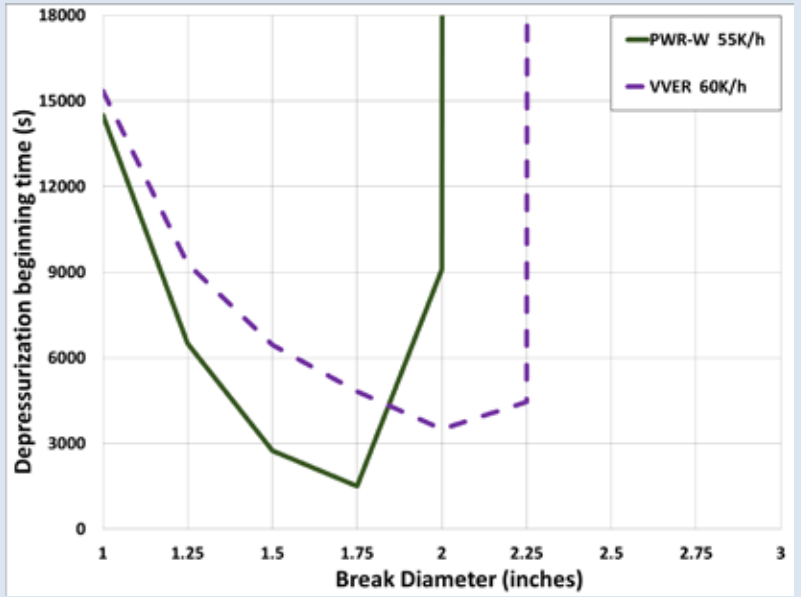




Damage Time. SBLOCA w HPSI failure



SBLOCA (2 in.) w HPSI failure.



Zry. PWR-3L .vs. VVER-1000

Actividades Realizadas.
Proyecto ISASMORE: Secuencias accidentales en VVER con ATF

Sequence	E110 (1477 K) [s/min]	FeCrAl (1477 K) [s] (Δt) [min]	FeCrAl (1773 K) [s] (Δt) [min]
LBLOCA (No ECCS)	77 **1.3**	107 **(0.5)**	205 **(2)**
2 inches SBLOCA	7822 **130.4**	**No damage**	**No damage**
1 inches SBLOCA	15357 **256**	15927 **(9.5)**	17008 **(27.5)**
SBO	13546 **226**	16206 **(44)**	17386 **(64)**

Sequence	E110 (1477 K) [s/min]	Cr-coated Zry (1477 K) [s] (Δt) [min]	Cr-coated Zry (1605 K) [s] (Δt) [min]
LBLOCA (No ECCS)	77 **1.3**	90 **(0.2)**	113 **(0.5)**
2 inches SBLOCA	7822 **130.4**	**No damage**	**No damage**
1 inches SBLOCA	15357 **256**	15802 **(7.5)**	16032 **(11)**
SBO	13546 **226**	16041 **(41.5)**	16436 **(48)**

Elena Redondo-Valero, César Queral, Kevin Fernández-Cosials, Jorge Sánchez-Torrijos, David Canal, Emilio Castro-González, Victor Hugo Sánchez-Espinoza. **Comparative analysis of accidental sequences with conventional and Accident Tolerant Fuels (ATF) in VVER-1000 reactors**. Nuclear Engineering and Design, Volume 446, Part B, **2026**.

Actividades Realizadas.
Proyecto SPAR-CSN: Impacto de los ATF en la reducción de la CDF

- Collaboration between **CSN** and **UPM**.
- Generic Standardized Plant Analysis Risk (SPAR) model: SPAR-CSN
- 3-loop PWR-WEC design.
- PSA model independent from the industry, like to NRC SPAR models.

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

POLITÉCNICA

ID	Initiating event	ID	Initiating Event
LBLOCA	LOCA (> 6 in.)	MSLB-US	Main Steam Line Break upstream of MS isolation valves (MSIV)
MBLOCA	LOCA (2 in. to 6 in.)	MSLB-DS	Main Steam Line Break downstream of MSIV
SBLOCA	LOCA (3/8 in. to 2 in.)	SGTR	Steam Generator Tube Rupture
GT	General Transient	LCWA	Loss of a CW train
ATWS	Anticipated transient without SCRAM	LNSW	Loss of Non-essential Service Water System
LC	Loss of Condenser	LOOP/SBO	Loss of Offsite Power/ Station Blackout
LDC-A	Loss of emergency DC-A bus	LDC-B	Loss of emergency DC-B bus

Actividades Realizadas.
Proyecto SPAR-CSN: Impacto de los ATF en la reducción de la CDF

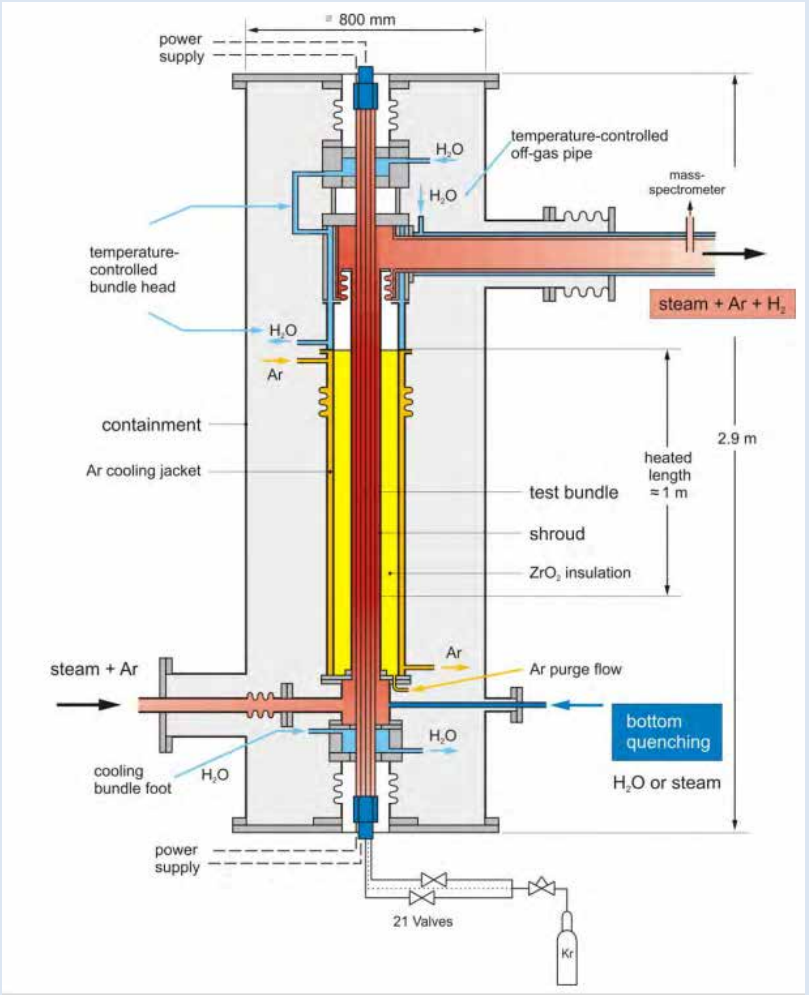
Time to CD (min)	Increase in time available (min)	
	Cr-Coated	FeCrAl
50-80	2	6
130-160	5	10
300-350	10	21
500-550	12	50

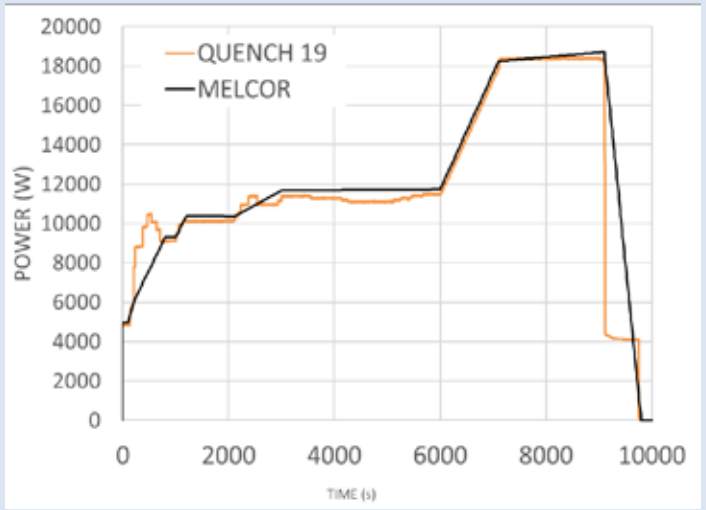
CDF Zry (1/y)	CDF Cr-Coated Zry (1/y)	ΔCDF Cr-Coated	CDF FeCrAl (1/y)	ΔCDF FeCrAl
5.5E-07	5.2E-07	-5%	4.9E-07	-10%

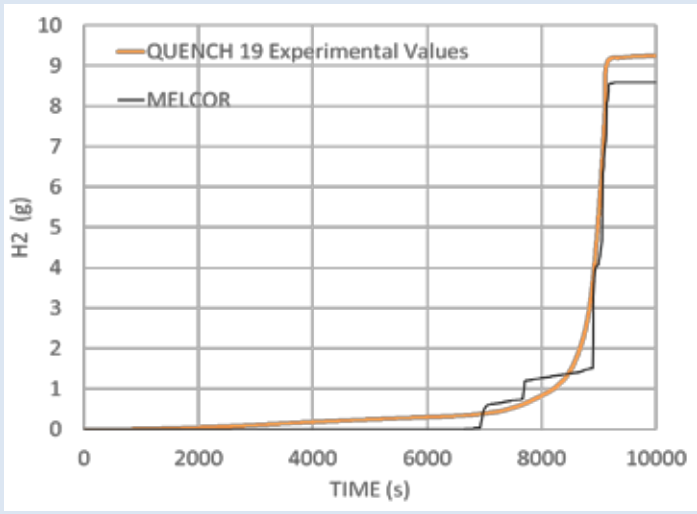
Actividades Realizadas.
Proyecto ATF-TS: Experimento QUENCH-19 con FeCrAl (MELCOR)

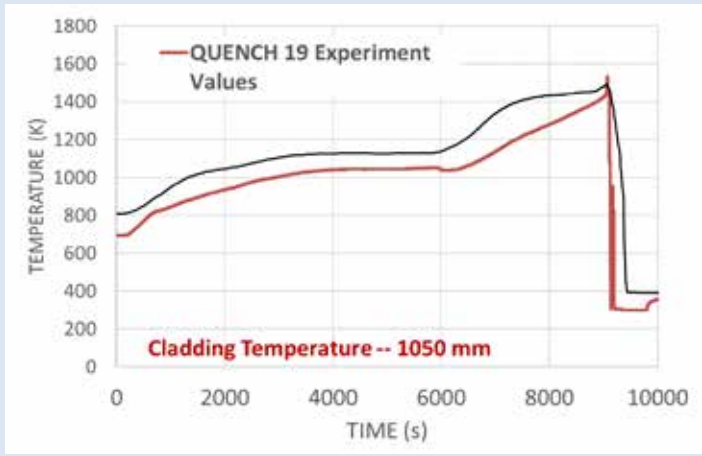
UPM – NFQ Activities:

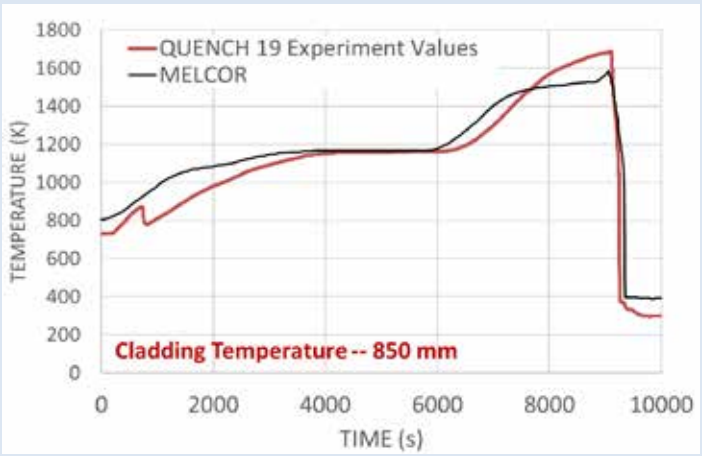
- Experimental tests: PUZRY and FCA burst tests; impact of ATF in IFA 650.10 (BEPU **TRACE** and **TU**); QUENCH-19 (**MELCOR**)
- PWR LBLOCA and SBLOCA analyses (**TRACE**)





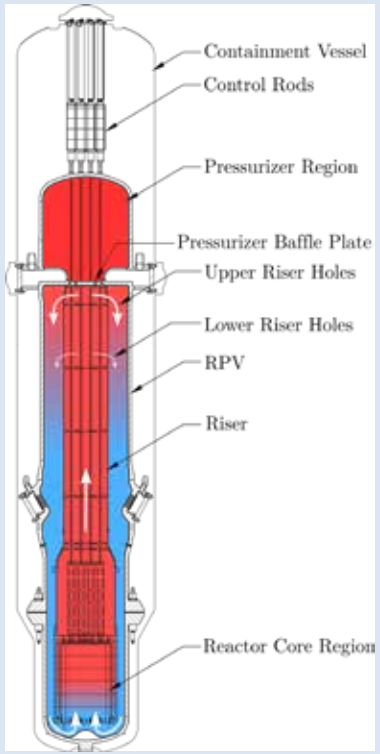




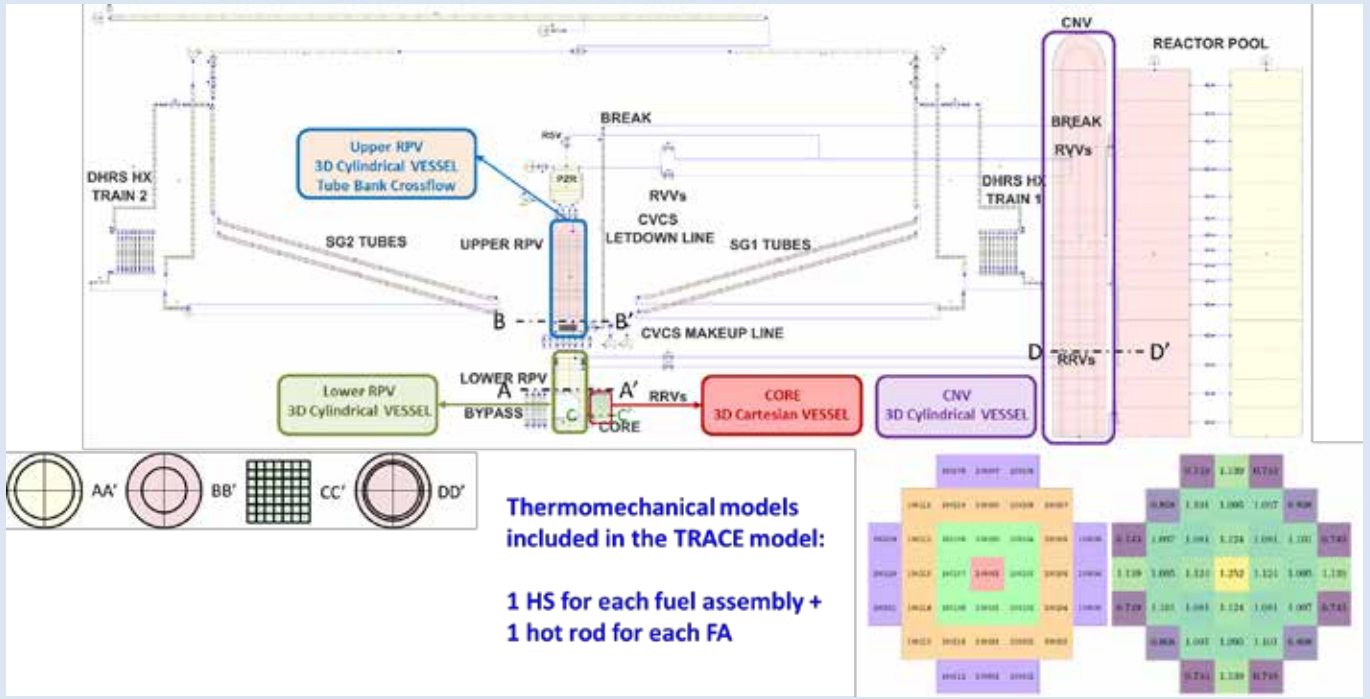


Actividades Realizadas. Proyecto I-NERI: Modeling of Small Modular Reactors with Accident Tolerant Fuels.

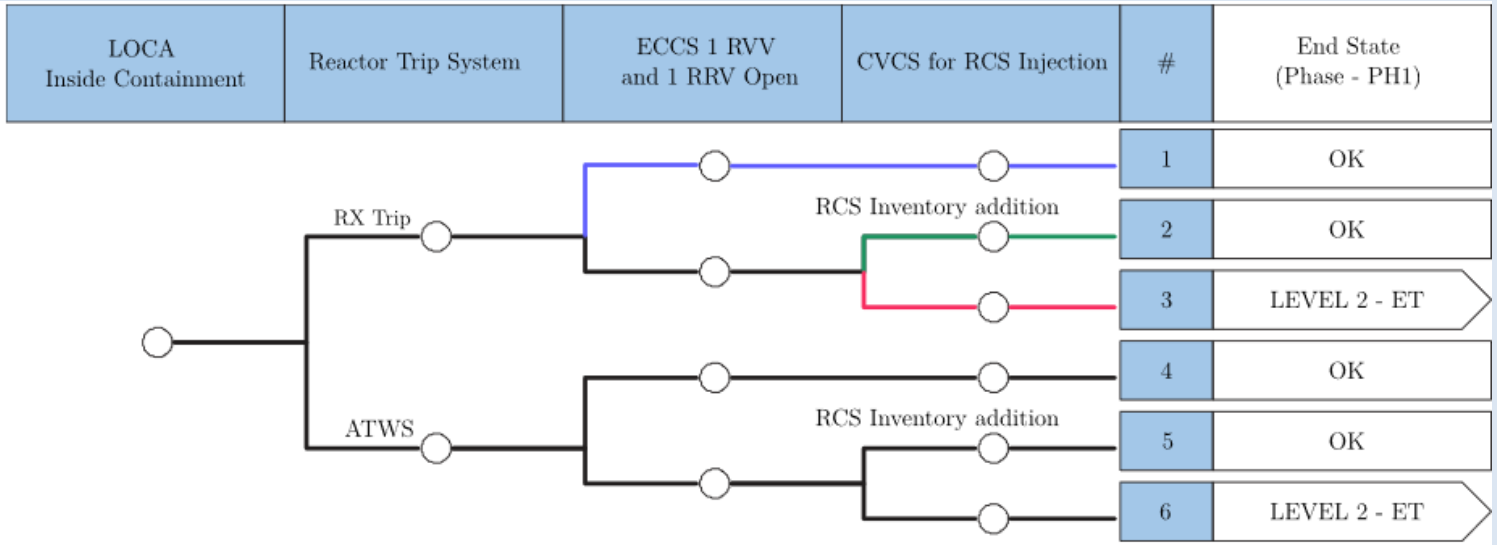
- Task 1: **Non-proprietary TRACE/PARCS model of NuScale**
- Task 2: **ATF material properties and models**
- Task 3: Risk-informed Accident Sequences. PRA model development
- Task 4: **Accident analysis. NuScale (TRACE). LOCA, SBO, ATWS, Loss of DC, Loss of support system; Generic Transient.**
- Task 5: Multi-physics Simulation of ATF Cladding Performance
- Task 6: Evaluation of Impact of ATF on SMRs

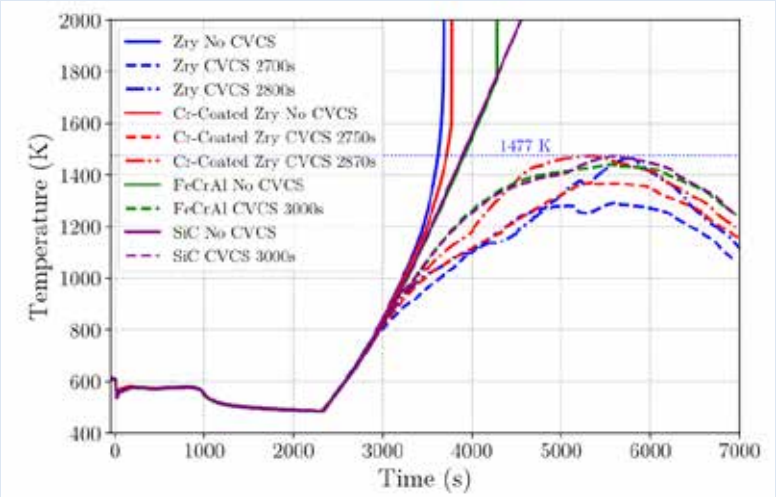


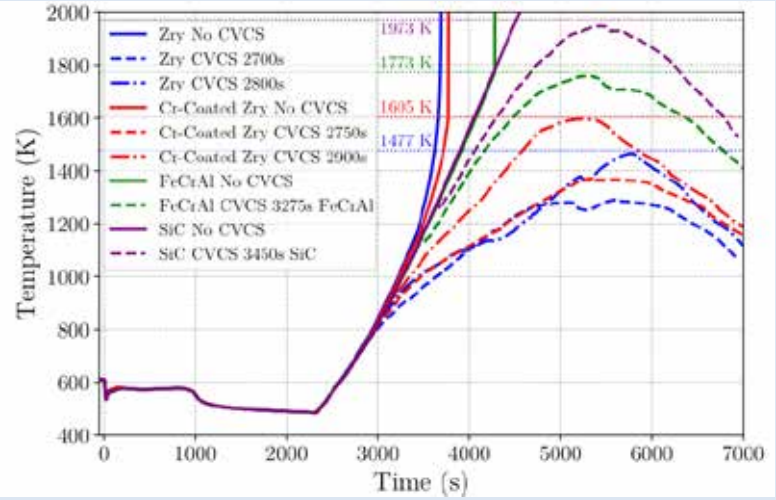


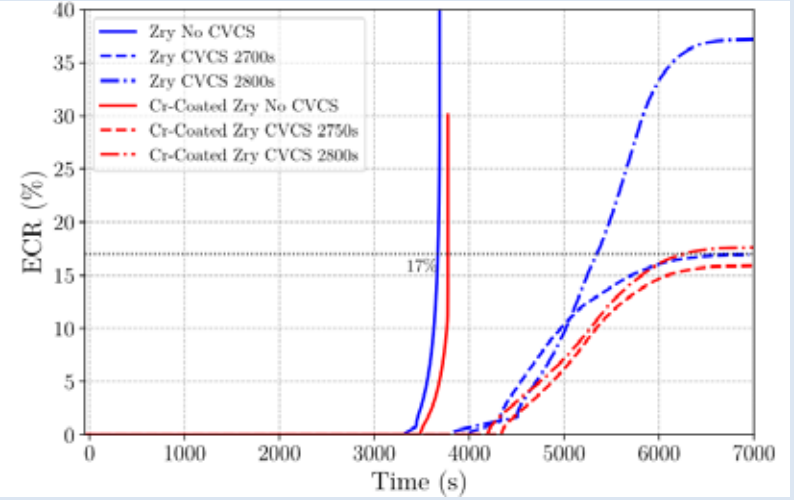


Actividades Realizadas. Proyecto I-NERI: Modeling of Small Modular Reactors with Accident Tolerant Fuels.









Actividades Realizadas. Proyecto I-NERI: Modeling of Small Modular Reactors with Accident Tolerant Fuels.

Material	$t_{A\text{-}T1}$ (min)	$t_{A\text{-}T2}$ (min)	$t_{A\text{-}Ox}$ (min)	Δt_{A1} (min)	Δt_{A2} (min)
Zry	46.7	–	45	–	–
Cr-coated Zry	47.8	48.3	45.8	0.8	0.8
FeCrAl	50.0	54.6	–	5	9.6
SiC	50.0	56.7	–	5	11.7

Yago Martínez González, César Queral, Jorge Sánchez-Torrijos, Arantxa Cuadra, David Canal, Emilio Castro, Kevin Fernández-Cosials. "**Analysis of Risk-Important LOCA Sequences in NuScale considering Accident Tolerant Fuels**". Nuclear Engineering and Design, volume 453, **2026**.

Divulgación.
Curso: termomecánica del combustible

1. ***Descripción del combustible en reactores PWR/BWR***. César Queral (**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 Queral (**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**).

Curso INGENIA/UPM: Diseño de Reactores Nucleares - “Accident Tolerant Fuels for LWRs”

Segunda Jornada CEIDEN – UPM: “Accident Tolerant Fuels for LWRs”
Fecha: 20 de mayo de 2020, de 09:00 a 13:00h.

Presentaciones (disponibles en la web del CEIDEN):

- Introducción y Programa
- Arjan Plompen (JRC) – «The JEFF nuclear data file and the need for your development goals»
- Allan Simpson (UK NNL) – «Nuclear Data for ATF: A UK Perspective»
- Cedric Cozzo (PSI) – «PSI developments on ATF»
- Robert Kilger (GRS) – «Current neutronics activities on LWR ATF at GRS»
- **INGENIA UPM – «UPM – CDIO Project in Nuclear Engineering Education»**
- **INGENIA UPM – «PWR 3D Core Simulation using different ATF cladding materials»**
- **INGENIA UPM – «PWR 3D Core Simulation using different ATF fuels»**
- **INGENIA UPM – «Simulation of the Power Maneuvering of PWRs using new ATF»**
- Daniel Cano (CIEMAT) – «Emerging activities on nuclear data for ATF at CIEMAT»

https://ceiden.com/programas/grupo-siren-simulacion-de-reactores-nucleares/segunda-jornada-ceiden-upm-accident-tolerant-fuels-for-lwrs/

Divulgación: Artículos

1. Jorge Sánchez-Torrijos, Pau Aragón, César Queral, Francisco Feria, Arndt Schubert, Paul Van Uffelen "**A review on the thermo-mechanical modelling needs in system codes**". Nuclear Engineering and Design, Volume 406, **2023**.
2. N. Doncel, L. Martínez, P. Aragón, F. Feria, L.E. Herranz, C. Queral, K. Fernández-Cosials, J. Ruiz-Hervias, M. Cristobal-Beneyto, E. Castro, J. Sánchez-Torrijos, A. Soler "**R&D in advanced technology fuels (ATFs) in Spain**", Nuclear Engineering and Design, Volume 424, **2024**.
3. B. Navarro, T. Barrachina, R. Miró, G. Verdú, J.C. García-Díaz. **U&S analyses in a BWR NPP LB-LOCA transient with ATF**. Nuclear Engineering and Design, Volume 446, Part A, **2026**.
4. Elena Redondo-Valero, César Queral, Kevin Fernández-Cosials, Jorge Sánchez-Torrijos, David Canal, Emilio Castro-González, Victor Hugo Sánchez-Espinoza. **Comparative analysis of accidental sequences with conventional and Accident Tolerant Fuels (ATF) in VVER-1000 reactors**. Nuclear Engineering and Design, Volume 446, Part B, **2026**.
5. Yago Martínez González, César Queral, Jorge Sánchez-Torrijos, Arantxa Cuadra, David Canal, Emilio Castro, Kevin Fernández-Cosials. "**Analysis of Risk-Important LOCA Sequences in NuScale considering Accident Tolerant Fuels**". Nuclear Engineering and Design, volume 453, **2026**.
6. David Canal, César Queral, Javier Magán, Emilio Castro-González, Jorge Sánchez-Torrijos. "**Quantification of the risk reduction due to the implementation of ATF claddings in Total Loss Feed Water sequences**". Nuclear Engineering and Design **2026**.

Divulgación: Ponencias

1. Sergio Courtin, César Queral, Alberto García-Herranz, Jorge Sánchez Torrijos, David Canal, Julia Herrero-Otero. **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) 15-20 julio de 2023 en Knoxville, TN (EEUU).
2. Emilio Castro, Amparo Soler, Jorge Pérez Fresno, Jorge Sánchez Torrijos, César Queral **Comparison of Zr-4 and FeCrAl Claddings under LOCA Conditions (IFA 650.10) Using TRANSURANUS**. 48 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. 4-6 de octubre de 2023, Toledo.
3. Kevin Fernández-Cosials, Jaime Valverde, Víctor Hugo Sánchez-Espinosa, César Queral **Assessment of ATF benefits in accidental sequences for commercial Light Water Reactors**. 48 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. 4-6 de octubre de 2023. Toledo.
4. David Canal, Emilio Castro González, Javier Gómez Magán, César Queral. **Análisis de los tiempos disponibles en secuencias accidentales de pérdida total de agua de alimentación en centrales PWR con combustible ATF**. 48 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. 4-6 de octubre de 2023. Toledo.
5. César Queral, Elena Redondo-Valero, David Canal, Emilio Castro, Jorge Sánchez-Torrijos, Amparo Soler, Victor Sánchez-Espinoza **Transient analysis in PWR, VVER, SMRs and experimental facilities** Autumn CAMP Meeting 2023. 13 a 15 de noviembre de 2023, Washington DC.
6. Jorge Sánchez-Torrijos, Emilio Castro, David Canal, Jorge Pérez, Amparo Soler, César Queral, Jinzhao Zhang **Assessment of ATF claddings performance under LOCA conditions using TRACE and TRANSURANUS codes** Workshop on Core and Plant Simulation with an Emphasis on Fuel Behaviour in Light Water Reactor Based Small Modular Reactors, IAEA meeting. Viena, 27-29 Feb 2024.
7. B. Navarro, T. Barrachina, R. Miró and J. C. García-Díaz **U&S Analyses in a BWR NPP LB-LOCA Transient with ATF**. Best Estimate Plus Uncertainty International Conference (BEPU 2024), Real Collegio, Lucca, Tuscany, Italy, May 19-24, 2024.
8. César Queral, Kevin Fernández-Cosials, Elena Redondo Valero, David Canal, Emilio Castro, Jorge Sánchez Torrijos, Yago Martínez, Jorge Arrabal de Haro, Alejandro Taboada Asensio, Manuel Pérez García. **Actividades en la UPM orientado a secuencias DEC-A**. 10 JORNADA TÉCNICA DE CAMP-ESPAÑA. 18 de junio de 2024, Madrid.
9. Jorge Sánchez-Torrijos, Amparo Soler, Emilio Castro, David Canal, César Queral **Simulation of the Halden IFA 650.10 LOCA test considering conventional and advanced cladding materials using TRACE** TopFuel 2024. 29 September - 3 October 2024, Grenoble, France.
10. Jorge Sánchez Torrijos, Amparo Soler, Emilio Castro, César Queral. **SIMULATION OF THE HALDEN IFA 650.10 LOCA TEST WITH TRACE AND TRANSURANUS CODES: APPLICATION TO e-ATF MATERIALS** 50 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, 9-11 de octubre de 2024, Córdoba.
11. Jorge Sánchez-Torrijos, Yago Martínez, Amparo Soler, Emilio Castro, César Queral. **Analysis of DEC-A sequences in a NUSCALE-like SMR considering ATF fuel performance using the system code.** International Conference on Small Modular Reactors and their applications. 21 a 25 de octubre 2024.
12. Elena Redondo-Valero, César Queral,Jorge Sánchez-Torrijos, Emilio Castro-González, Victor Hugo Sánchez-Espinoza **Comparative analysis of accidental sequences with conventional and Advanced Tolerant Fuels (ATF) in VVER-1000 reactors**. The 7th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources, NURER2024. 27-30 October 2024, Antalaya, Turquía.
13. Elena Redondo-Valero, Jorge Sánchez-Torrijos, César Queral, David Canal, Emilio Castro-González, Víctor Sánchez-Espinoza. **FeCrAl and Cr Coating ATF Performance in Accidental Sequences of VVER-1000 Reactors.** 21st International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-21), 31 de agosto - 5 de septiembre, Busan, Corea del Sur.
14. David Canal, César Queral, Emilio Castro-González, Jorge Sánchez-Torrijos. **BEPU LBLOCA Analysis including Zirlo, FeCrAl and Cr-coated Zry Cladding**. 21st International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-21), 31 de agosto - 5 de septiembre, Busan, Corea del Sur.
15. David Canal, César Queral, Emilio Castro, Jorge Sánchez-Torrijos. **Analysis of the Time Available in Case of Accidental TLFW Sequences in PWR NPPs with ATF**. American Nuclear Society 2025, Chicago (EEUU).
16. Yago Martínez-González, César Queral, Jorge Sánchez-Torrijos. **Thermal-Hydraulic Analysis of Generic Transient Sequences in NuScale with the TRACE Code**. International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), Bled, Eslovenia, 8-11 de septiembre 2025.
17. César Queral, David Canal, Sergio Courtin, Kevin Fernández-Cosials, Jorge Sánchez-Torrijos, Emilio Castro-González, Yago Martínez-González, Rodrigo Rivilla-Gallego. **Safety enhacement in PWR by means of Accident Tolerant Fuels**. International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), Bled, Eslovenia, 8-11 de septiembre 2025.
18. David Canal, César Quéral, Emilio Castro-González, Jorge Sánchez-Torrijos. **BEPU LBLOCA análisis en vainas de Zirlo, FeCrAl y Zry con recubrimiento de Cr**. 51 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, septiembre de 2025, Cáceres.
19. Rodrigo Rivilla, Kevin Fernández-Cosials, César Queral. **ANALYSIS OF ACCIDENTAL SEQUENCES ON A PWR REACTOR USING MELCOR CODE FOR DIFFERENT ADVANCE TECNOLOGY FUELS**. 51 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, 24 26 de septiembre de 2025, Cáceres.
20. Yago Martínez-González, César Queral, Kevin Fernández-Cosials, Jorge Sánchez-Torrijos, Emilio Castro González, David Canal. **Thermal-Hydraulic Analysis of Generic Transient sequences in NuScale with the TRACE system code**. 51 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, de septiembre de 2025, Cáceres.
21. Yago Martínez-González, César Queral, Kevin Fernández-Cosials, Jorge Sánchez-Torrijos, Emilio Castro González, David Canal. **Thermal-Hydraulic Analysis of LOCA sequences in NuScale with the TRACE system code**. 51 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, septiembre de 2025, Cáceres.
22. César Queral, David Canal, Sergio Courtin, Jorge Sánchez-Torrijos, Emilio Castro-González. **Risk Reduction by means of Advanced Technology Fuels**. 4th International Conference on Radiations and Applications (ICRAA-4), 13-15 abril 2025, Argel, Argelia.

Conclusiones

1. Los materiales de vaina y combustible ATF muestran características de gran interés en operación normal y AOO que pueden permitir aumentos del enriquecimiento y/o el quemado y reducir el número de elementos en cada recarga.
2. Desde el punto de vista de las secuencias accidentales se observan incrementos de los tiempos disponibles dependientes de los materiales utilizados.
3. La disminución del riesgo es relativamente baja desde el punto de vista del APS nivel 1. También depende de la modelación e hipótesis realizadas sobre las acciones humanas.
4. Todavía es necesario realizar un amplio conjunto de experimentos para caracterizar adecuadamente estos materiales.
5. Es necesario participar en nuevos proyectos nacionales e internacionales relacionados con esta temática.
6. Por último, cabe destacar la mejora de la formación de un amplio conjunto de personas que hoy en día trabajan en el sector nuclear, incluyendo cuatro tesis doctorales.

Agradecimientos al CSN

Dedicado a José María Izquierdo Rocha (1947–2023)

