

# SUBVENCIÓN PARA REALIZACIÓN DE ACTIVIDADES DE I+D

## PROYECTO M(AT)2F (2023-2025)

Metodologías de análisis de comportamiento termo-  
mecánico de combustibles resistentes a accidentes (ATFs):  
desarrollo y aplicaciones

**F. Feria, P. Aragón, L.E. Herranz**

Unidad de Seguridad Nuclear  
Departamento de Fisión Nuclear  
CIEMAT



# Índice

- 01** **Introducción**
- 02** **Principales resultados**
- 03** **Síntesis**

# 01

# INTRODUCCIÓN

Investigación actual en combustible nuclear → Búsqueda de excelencia en condiciones actuales

## ATFs

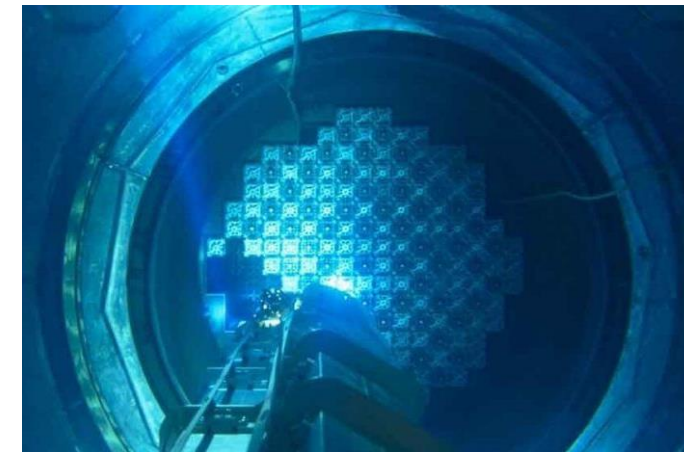
Respuesta segura en accidentes + Mejora comportamiento en ciclos más largos

y relación coste-eficacia  
(↑quemado, enriquecimiento)

### *Accident Tolerant Fuels*



### *Advanced Technology Fuels*



## Categorización ATF → Función de cambios de materiales en barra combustible actual

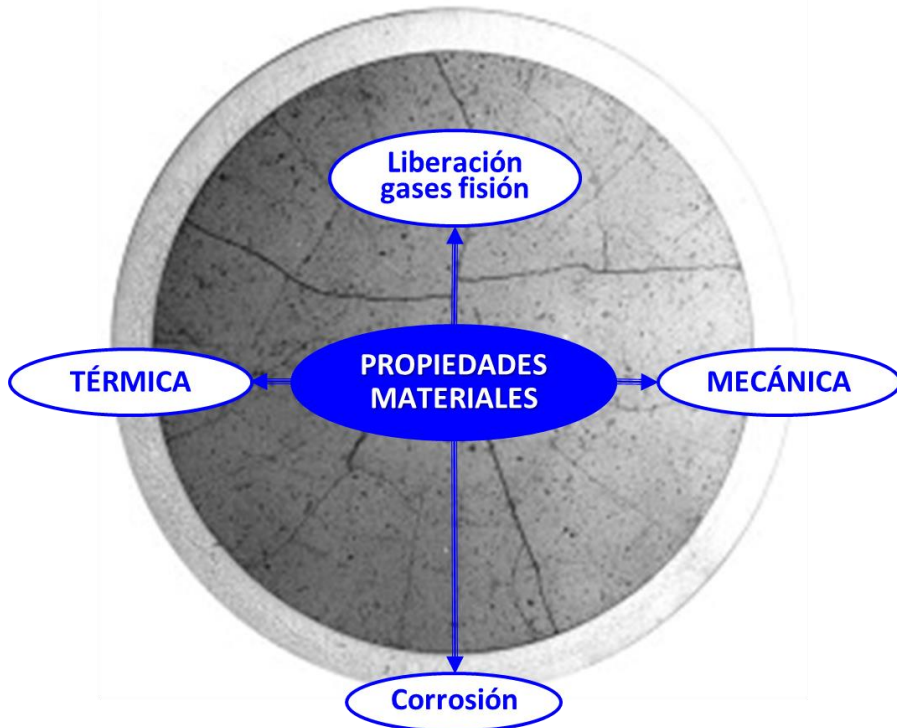


Categoría	Vaina	Pastilla
Convencional	Aleación Zr	UO <sub>2</sub>
Evolutivo ("corto plazo")	Recubrimiento de Cr Acero avanzado (FeCrAl)	UO <sub>2</sub> dopado (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Revolucionario ("largo plazo")	SiC/SiC Metales refractarios	UO <sub>2</sub> (U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> ) TRISO (UO <sub>2</sub> / UCO)

## Desafío ATFs

Demostrar comportamiento seguro en operación y accidentes...

...requiere metodologías de análisis basadas en **herramientas predictivas fiables**



## Extensión de códigos termo-mecánicos

Identificación/Derivación/Adaptación de modelos de propiedades de nuevos materiales



## Desarrollo de herramientas predictivas fiables del comportamiento de ATFs evolutivos potencialmente integrables en metodologías de análisis de seguridad

### Alcance:

- **Materiales:** Pastilla de combustible:  $\text{UO}_2$  dopado con  $\text{Cr}_2\text{O}_3$   
Vaina: FeCrAl / Zry - Cr
- **Condiciones de contorno:** operación normal / DBA (LOCA, RIA)
- **Códigos:** FRAPCON/FRAPTRAN/FAST (NRC) (& DAKOTA)

### Fases de desarrollo:

- Compilación/revisión de datos de propiedades de ATFs evolutivos
- Extensión/evaluación de herramientas predictivas actuales
- Adaptación de metodologías de análisis de seguridad para los nuevos combustibles



CRP - Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (ATF-TS)

- **Año 1: Estado del arte de modelado termo-mecánico de ATFs evolutivos**
  - Construcción de bases de datos
  - Desarrollo y/o mejora de modelos termo-mecánicos
- **Año 2: Extensión de códigos termo-mecánicos FRAPCON/FRAPTRAN/FAST**
  - Adaptación de desarrollos y/o mejoras de modelos
  - Verificación/Validación (BEPU)
- **Año 3: Metodología de análisis de seguridad**
  - Selección de metodología y adaptación a códigos extendidos
  - Aplicación a escenarios postulados

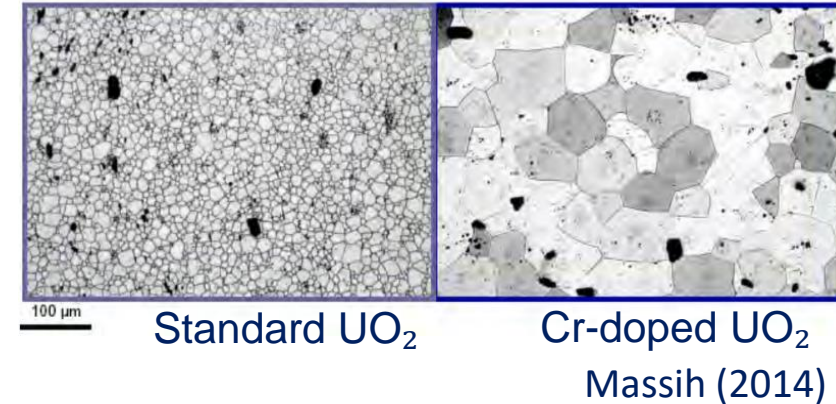
# 02

## PRINCIPALES RESULTADOS

## Estado del arte – Pastilla dopada

$\text{Cr}_2\text{O}_3$  (<1 wt%) → Mayor tamaño de grano → Mejoras:

- Retención de gases de fisión
- Viscoplasticidad

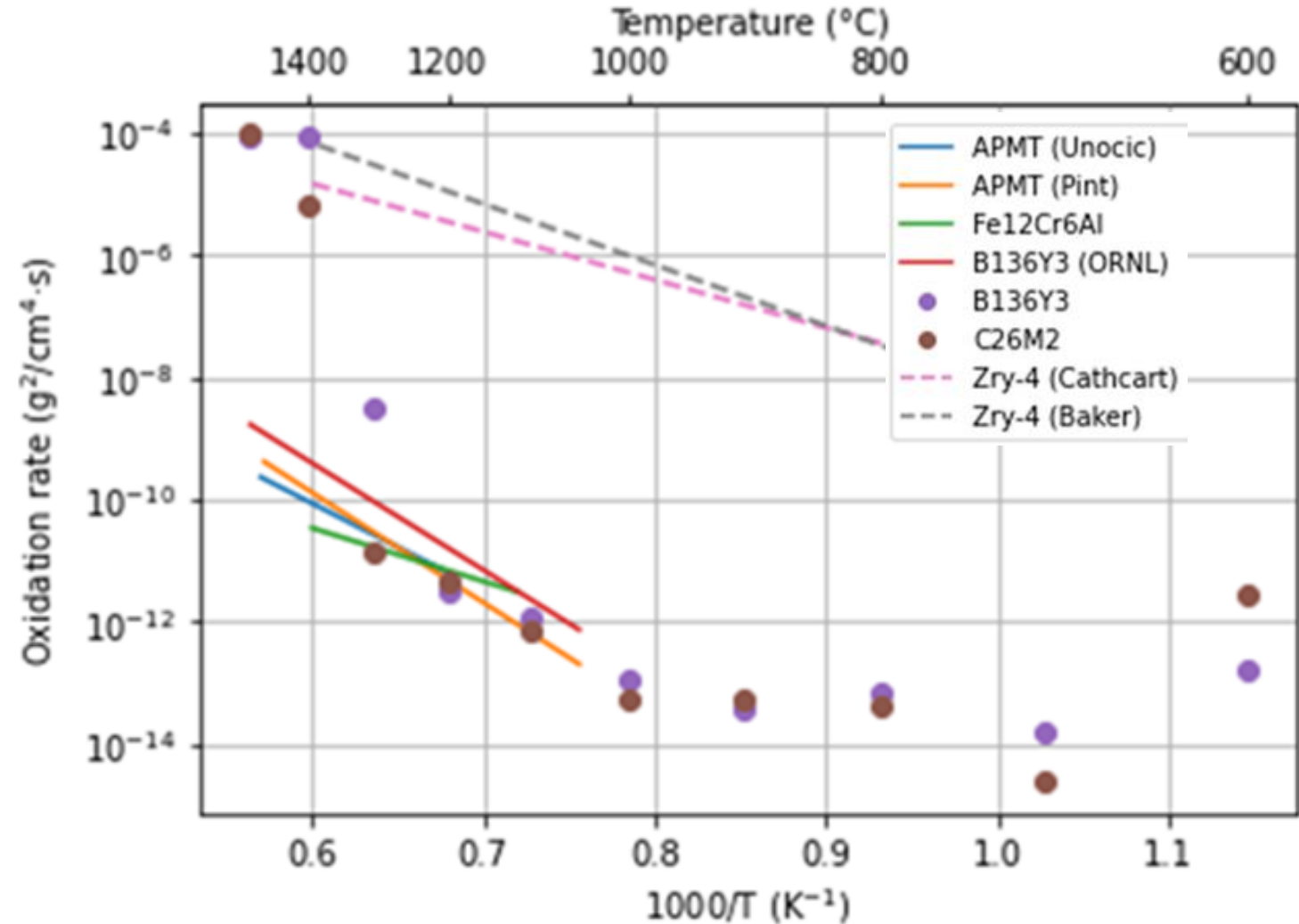


Database	Reference
Grain size ↑	50-60 $\mu\text{m}$ Fuglesang (2016)
Irradiation swelling ↑	0.062→0.068% per GWd/tU Fuglesang (2016)
Densification ↓	1%→0.15% Fuglesang (2016)
Fission gas retention ↑	Cooper et al. (2021)
Viscoplasticity ↑	Massih (2014)

## Estado del arte – Vaina de FeCrAl

Acero avanzado → Mejoras:

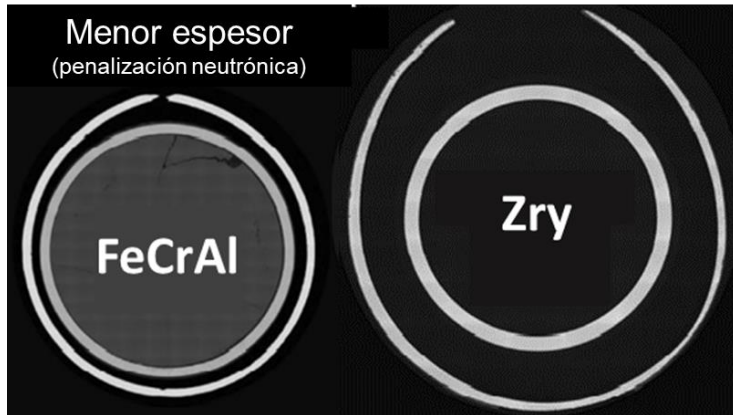
- Resistencia a oxidación



## Estado del arte – Vaina de FeCrAl

Acero avanzado → Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Bell et al. (2021)

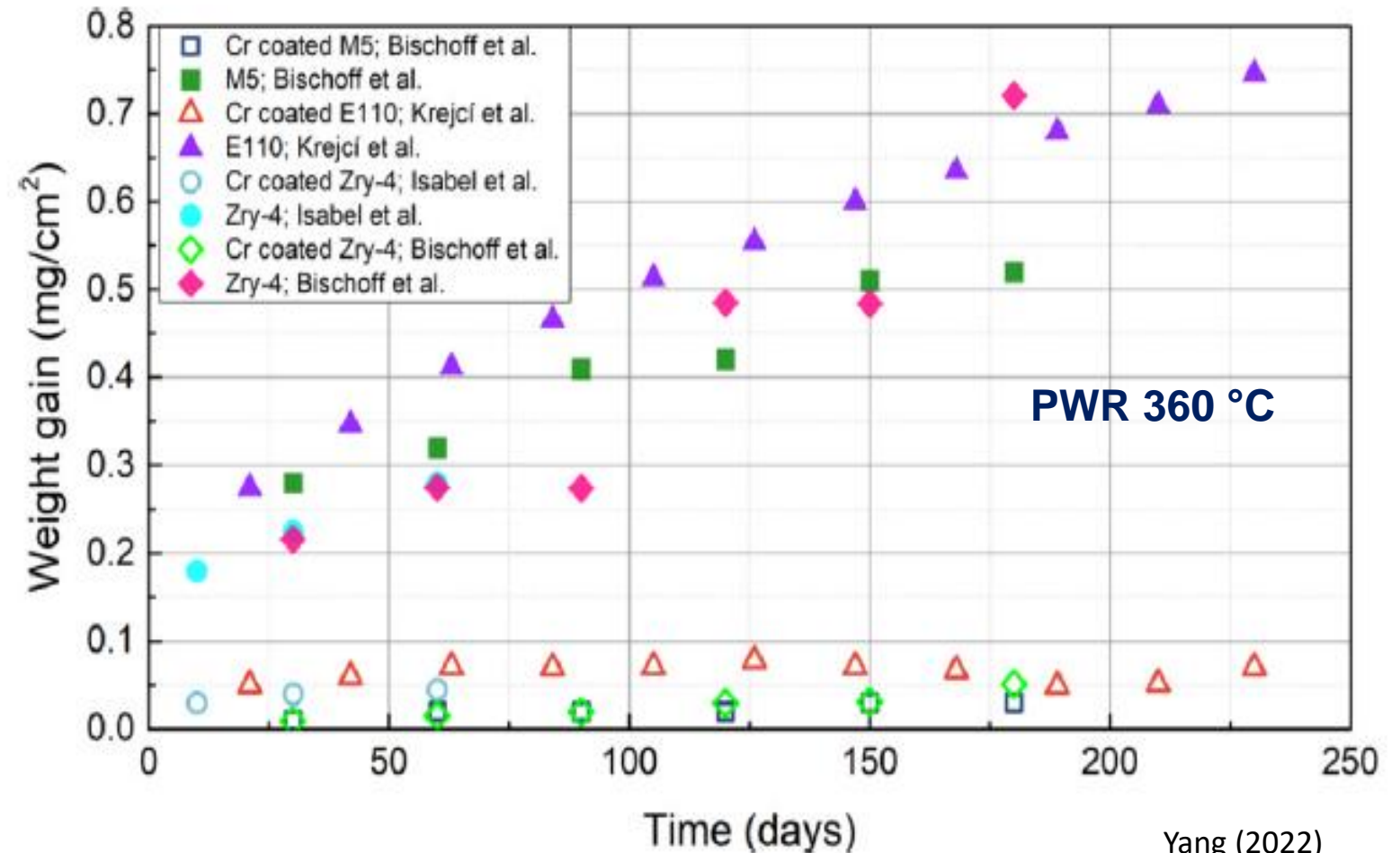
Thermal conductivity ≈	C35M	Field et al. (2018)
Thermal expansion ↑	C35M	Field et al. (2018)
Specific heat capacity ↑	C35M	Field et al. (2018)
Young's modulus ↑	Generalized	Thompson et al. (2015)
Poisson's ratio ≈	Generalized	Thompson et al. (2015)
Irradiation creep ↓	C35M	Terrani et al. (2016)
Instantaneous plasticity ↑	C26M	CIEMAT from Bell et al. (2021)
High-temperature creep ↓	Generalized	Field et al. (2018)
Burst stress ↑	C26M	CIEMAT from Bell et al. (2021) & Garrison et al. (2022)
High-T oxidation ↓	C26M	CIEMAT from Kim et al. (2022)

**Material irradiado!**

## Estado del arte – Vaina con recubrimiento

Cr ( $\Delta < 20 \mu\text{m}$ )  $\rightarrow$  Mejoras:

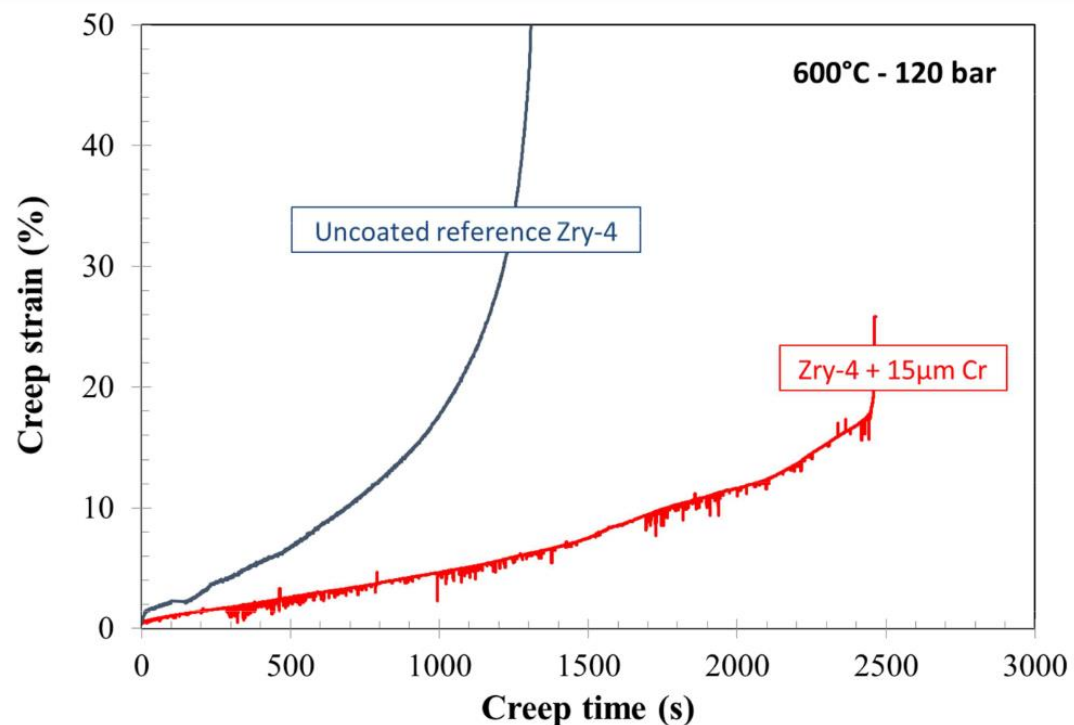
- Resistencia a oxidación



## Estado del arte – Vaina con recubrimiento

Cr ( $\Delta < 20 \mu\text{m}$ )  $\rightarrow$  Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Brachet et al. (2016)

Thermal conductivity $\uparrow$	Holzwarth et al. (2002)
Thermal expansion $\approx$	Holzwarth et al. (2002)
Specific heat capacity $\uparrow$	Holzwarth et al. (2002)
Young's modulus $\uparrow$	Wagih et al. (2018)
Poisson's ratio $\approx$	Simmons et al. (1971)
Irradiation creep $\approx$	Mulligan et al. (2024)
High-temperature creep $\downarrow$	Wagih et al. (2018)
Burst stress $\uparrow$	CIEMAT from Sweet (2022), Kane (2023), Ridley (2023), Hazan (2021), Bell (2022)
High-T oxidation $\downarrow$	Brachet et al. (2020)

**Material irradiado!**

## Revisión / Extensión / Evaluación

No simulan ATF's

### FRAPCON (v4.0)

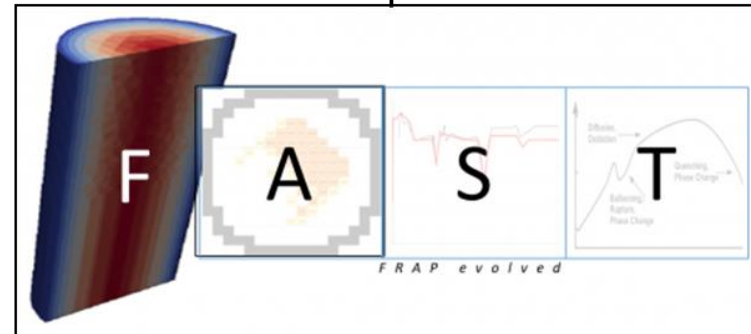
*Fuel Rod Analysis Package CONstant*

Estacionario (operación normal, rampas lentas)

### FRAPTRAN (v2.0)

*Fuel Rod Analysis Package TRANsient*

Transitorio (RIA, LOCA)



*Fuel Analysis under Steady-state and Transients*

Estacionario/Transitorio (operación normal, rampas / RIA, LOCA)

Simula ATF's, pero no validado y sin acceso a código fuente

## Revisión / Extensión / Evaluación

No simulan ATFs

### FRAPCON (v4.0)

*Fuel Rod Analysis Package CONstant*

Estacionario (operación normal, rampas lentas)

### FRAPTRAN (v2.0)

*Fuel Rod Analysis Package TRANsient*

Transitorio (RIA, LOCA)



## Extensión CIEMAT a ATFs

(acceso a código fuente)

- Pastilla dopada
- Vaina de FeCrAl
- Vaina recubrimiento Cr

## Revisión / Extensión / Evaluación

No simulan ATF's

### FRAPCON (v4.0)

*Fuel Rod Analysis Package CONstant*

Estacionario (operación normal, rampas lentas)

### FRAPTRAN (v2.0)

*Fuel Rod Analysis Package TRANsient*

Transitorio (RIA, LOCA)



## Extensión CIEMAT a ATF's

(acceso a código fuente)

- Pastilla dopada
- Vaina de FeCrAl
- Vaina recubrimiento Cr

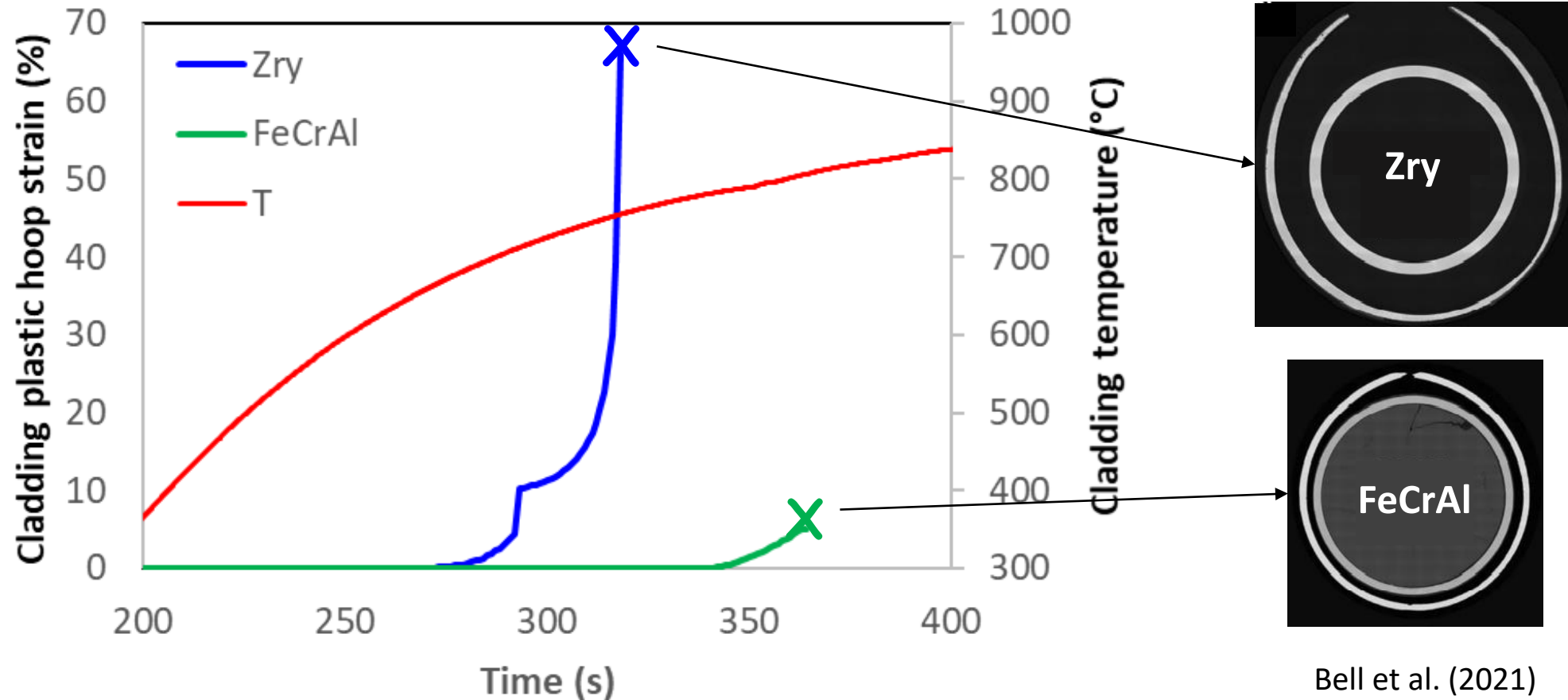
**Evaluación**



- Operación
- DBAs

### Vaina FeCrAl - LOCA

Simulación ensayo Halden - IFA-650.10 (barra PWR, 61 GWd/tU)



Bell et al. (2021)

### Vaina cromada. Aproximaciones de modelado:

- Propiedades efectivas
- **Modelado multicapa de sustrato y recubrimiento**



### **FRAPTRAN - TUmech**

(Modelo mecánico TU)

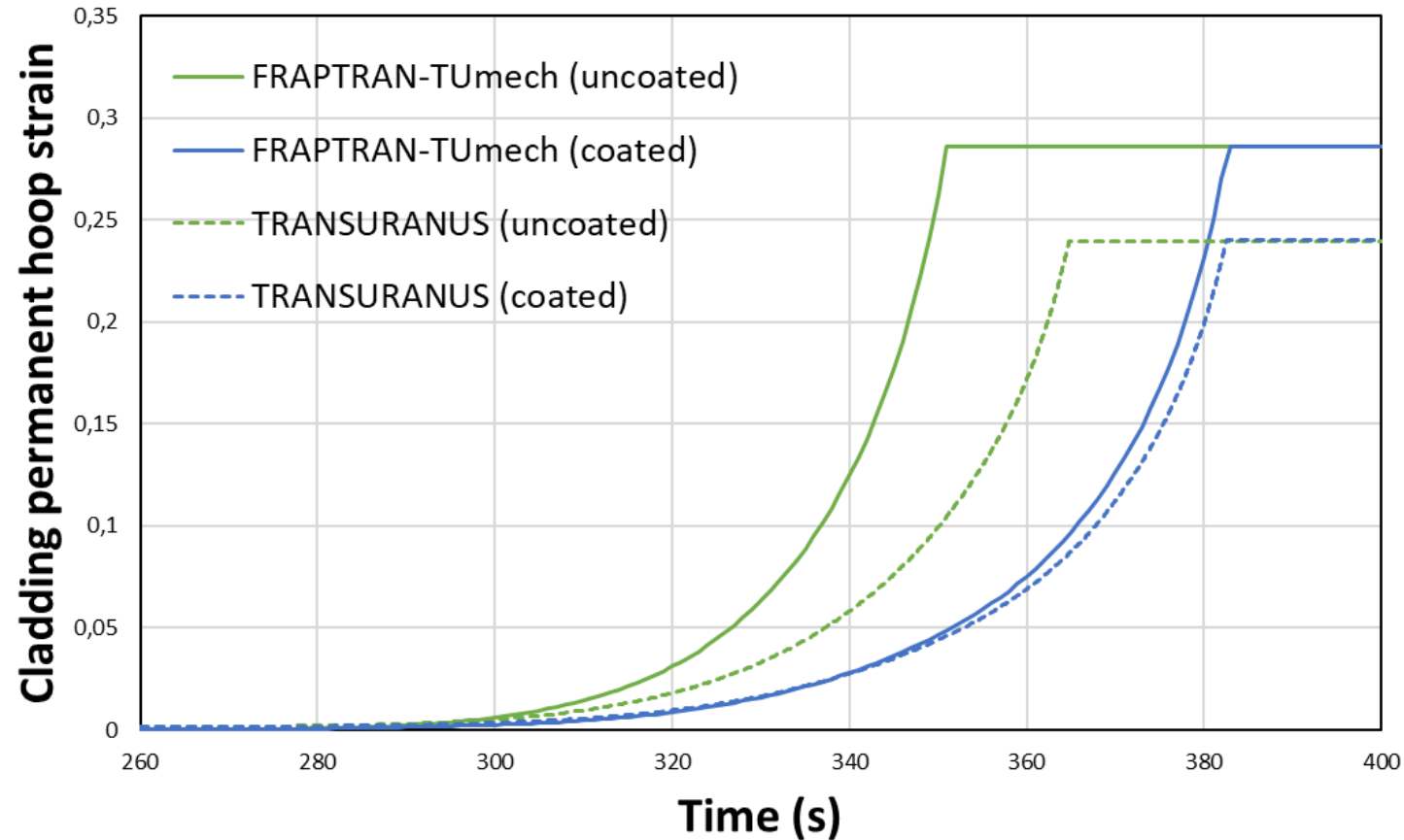
#### **Propiedades Cr:**

<b>Creep anisotropy</b>	Isotropic
<b>Elasticity constant</b>	Wagih et al. (2018)
<b>Poisson's ratio</b>	Simmons and Wang (1971)
<b>Thermal expansion</b>	Holzwarth and Stamm (2002)
<b>Thermal creep</b>	Wagih et al. (2018)
<b>Melting temperature</b>	Zr-Cr eutectic (1332°C)

+ Modelo de oxidación a alta temperatura

### Evaluación vaina cromada – LOCA

Simulación ensayo Halden - IFA-650.10 (barra PWR, 61 GWd/tU)



# Principales resultados

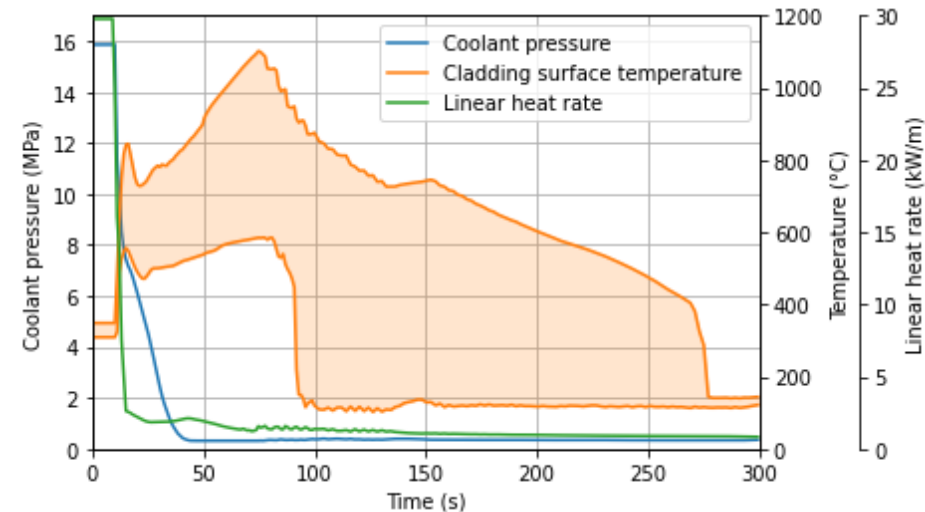
## Metodología de evaluación de seguridad



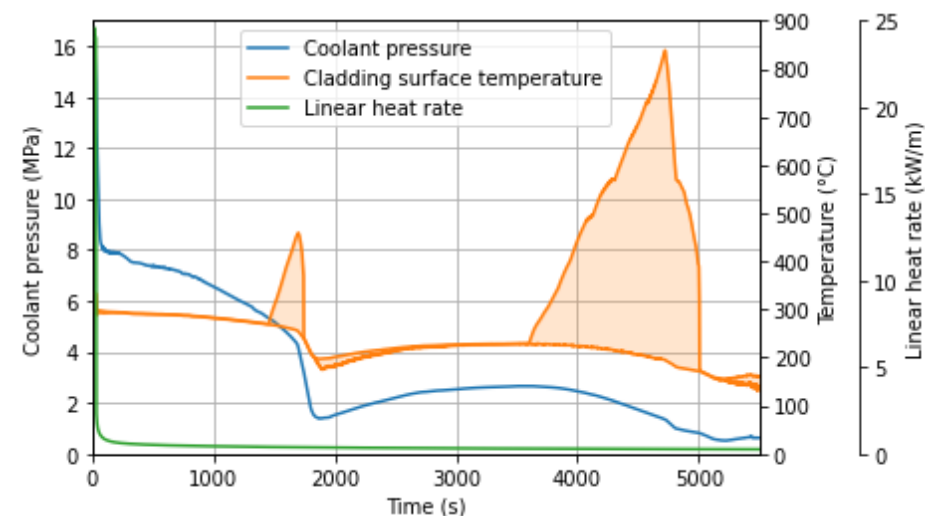
### Respuesta T-M de barra más caliente en núcleo

Scenario	DBA/LB-LOCA	DEC-A/SB-LOCA
Pellet		
Material	UO <sub>2</sub>	
Diameter [mm]	8.19	
Length [mm]	9.93	
Density [% TD]	95.5	
Enrichment [%]	4.5	
Cladding		
Material	Zircaloy-4 (SRA)	
Outer diameter [mm]	9.50	
Wall thickness [μm]	570	
Fuel rod		
Burnup [MWd/kgU]	26.40	
Active length [m]	3.66	
Plenum length [mm]	194.56	
Pellet-cladding gap [μm]	85.02	
Fill gas	100% He	
Fill pressure [MPa]	2.35 (@ 20 °C)	
Pitch [mm]	12.6	
Operating conditions		
Linear heat rate [kW/m]	29.776	24.560
Coolant pressure [MPa]	15.72	
Coolant inlet temperature [°C]	287	
Coolant mass flux [kg/m <sup>2</sup> .s]	3101.38	

### DBA. Double-ended LB-LOCA



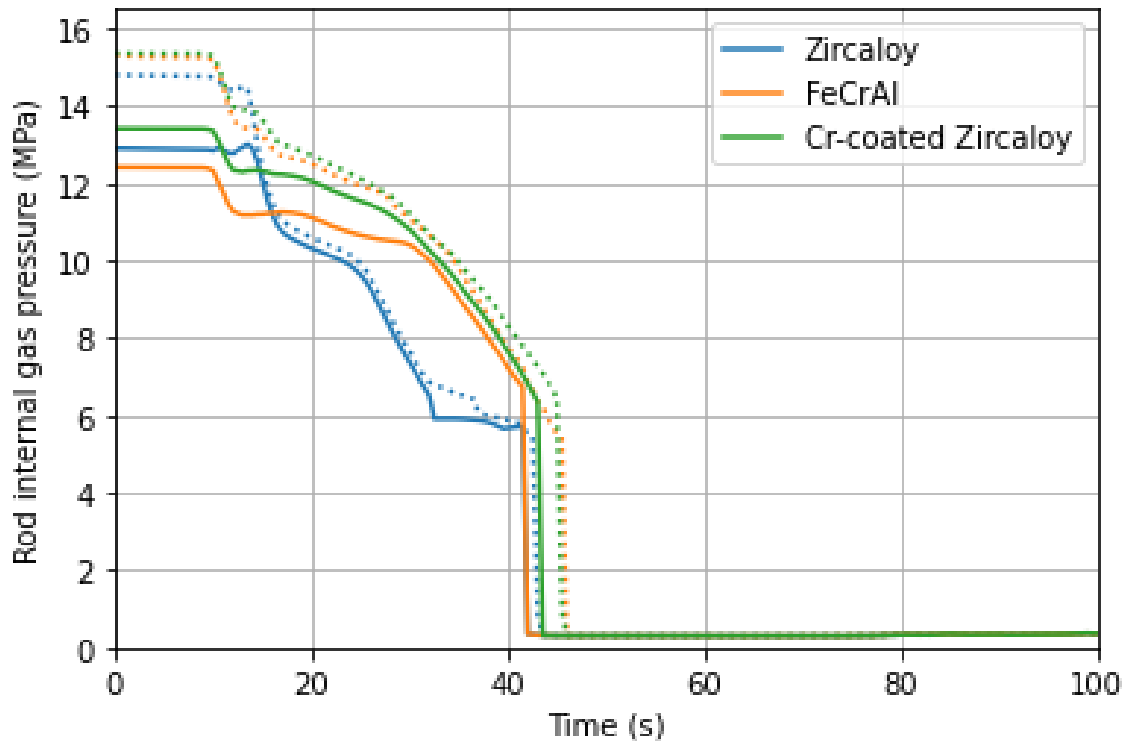
### DEC-A. SB-LOCA with failure of HPSI pumps



### Predicción BEPU

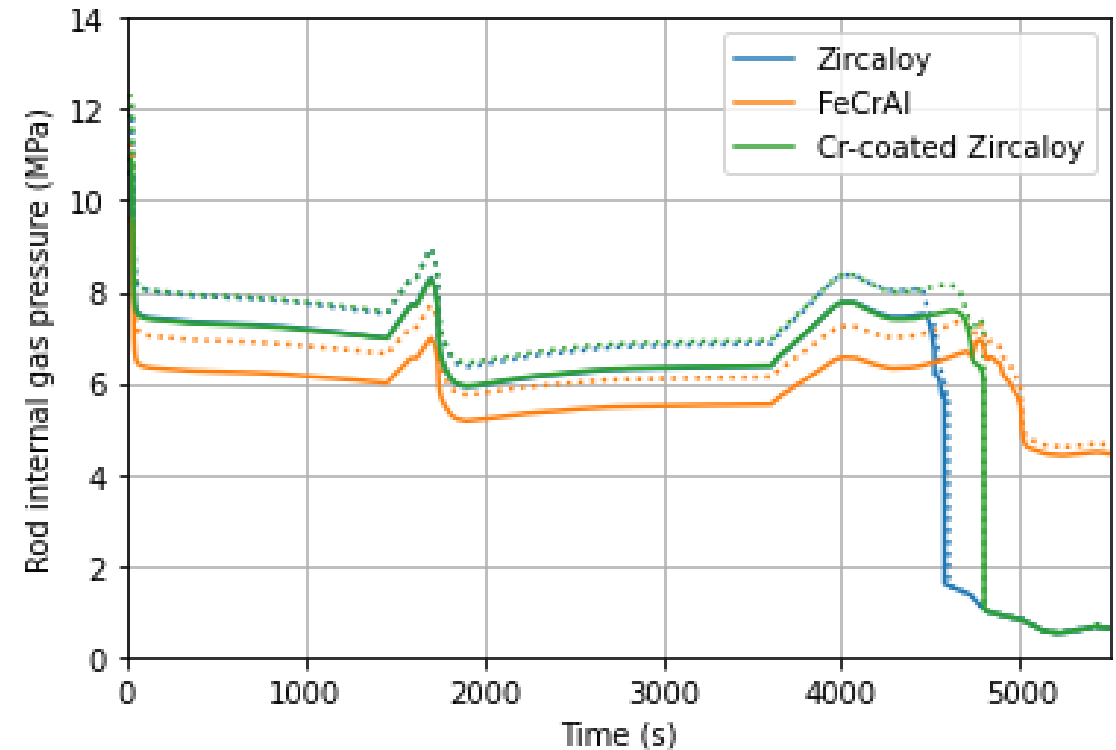
Mejor estimación (línea continua) + Incertidumbre (línea discontinua)

#### DBA/LB-LOCA



No diferencias significativas en tiempo de reventado

#### DEC-A/SB-LOCA



- Ligero retraso en fallo (vainas cromadas).
- FeCrAl no sufre fallo.

# 04

# SÍNTESIS

- Creación de una base de datos de propiedades de materiales para ATFs.
- Desarrollo de modelos y correlaciones para ATFs.
- Ampliación de capacidades predictivas de FRAPCON\FRAPTRAN a ATF.
- Verificación y validación de los códigos extendidos.
- Aplicación a análisis prospectivos de seguridad LOCA con vaina ATF.
- Identificación de futuras áreas de investigación de ATF donde existen lagunas en datos experimentales y conocimiento.

- P. Aragón, F. Feria, L.E. Herranz, ‘Modelling FeCrAl cladding thermo-mechanical performance. Part II: Comparative analysis with Zircaloy under LOCA conditions’, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 163, 2023.
- F. Feria, P. Aragón, L.E. Herranz, ‘Assessment of cladding ballooning during DBA-LOCAs with FRAPTRAN’, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 195, 2024.
- P. Aragón, F. Feria, L.E. Herranz, A. Schubert, P. Van Uffelen, ‘Enhancing cladding mechanical modelling during DBA/LOCA accidents with FRAPTRAN: The TUmech one-dimensional model’, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 171, 2024.
- N. Doncel, L. Martínez, P. Aragón, F. Feria, L.E. Herranz, C. Qeral, J. Sanchez-Torrijos, K. Fernandez-Cosials, J. Ruiz-Hervias, M. Cristobal-Beneyto, E. Castro, A. Soler, ‘R&D in advanced technology fuels (ATFs) in Spain’, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 424, 2024.
- P. Aragón, F. Feria, L.E. Herranz, A. Schubert, P. Van Uffelen, ‘Fuel performance modelling of Cr-coated Zircaloy cladding under DBA/LOCA conditions’, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 211, 2025.
- P. Aragón, F. Feria, L.E. Herranz, ‘Modelling FeCrAl cladding thermo-mechanical performance: CIEMAT’s contribution to IAEA/CRP ATF-TS’, *Nuclear Engineering and Design*, vo. 437, 114034.

## “Extension of the predictive capabilities of nuclear fuel performance codes to advanced technology fuels”

<https://orcid.org/0000-0003-3466-9039>

[E.T.S.I. Industriales \(UPM\)](#)

Pau Aragón

Directores: F. Feria  
L.E. Herranz

## ENEN PhD Prize 2025



# Gracias por vuestra atención

*Unidad de Seguridad Nuclear  
Unidad de Fisión Nuclear  
CIEMAT  
francisco.feria@ciemat.es*