

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

P. Aragón (Investigador Predoctoral), **F. Feria** (Científico Titular),
L.E. Herranz (Profesor Investigación)

*Unidad de Seguridad Nuclear
Unidad de Fisión Nuclear
CIEMAT*

Coordinador CSN: Enrique Vela

Jornadas I+D CSN
29 Febrero, 2024, Madrid



Índice

01 **Introducción**

02 **Plan de trabajo**

03 **Progreso**

04 **Síntesis**



Cimat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



01



INTRODUCCIÓN



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



Introducción

Contexto



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



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

ATFs

Respuesta segura en accidentes

Accident Tolerant Fuels



Introducción

Contexto



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

ATFs

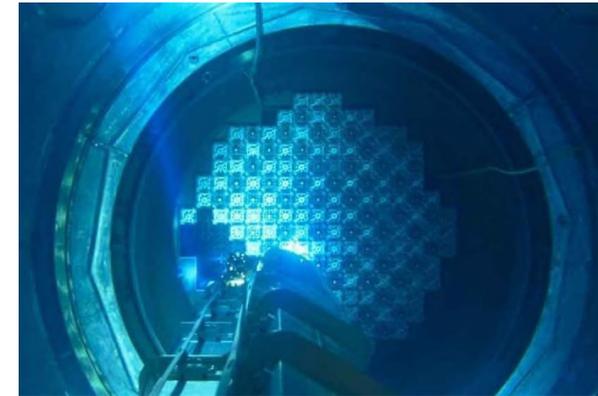
Respuesta segura en accidentes

+

Mejora comportamiento en ciclos más largos
y relación coste-eficacia

(↑quemado, enriquecimiento)

Accident Tolerant Fuels



Introducción

Contexto



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

ATFs

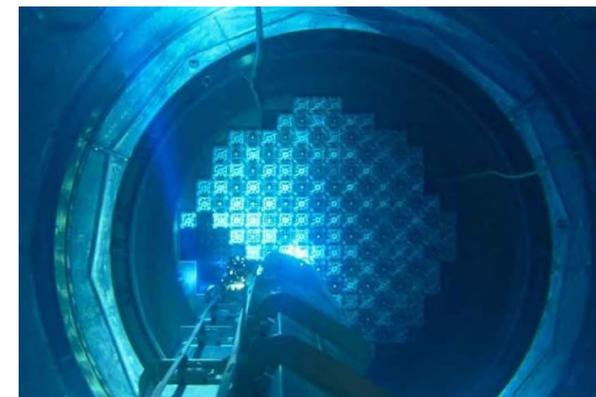
Respuesta segura en accidentes + Mejora comportamiento en ciclos más largos

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 ₂
Evolutivo (corto plazo)	Recubrimiento de Cr Acero avanzado (FeCrAl)	UO ₂ dopado
Revolucionario (largo plazo)	SiC Metales refractarios	UO ₂ alta conductividad/densidad TRISO

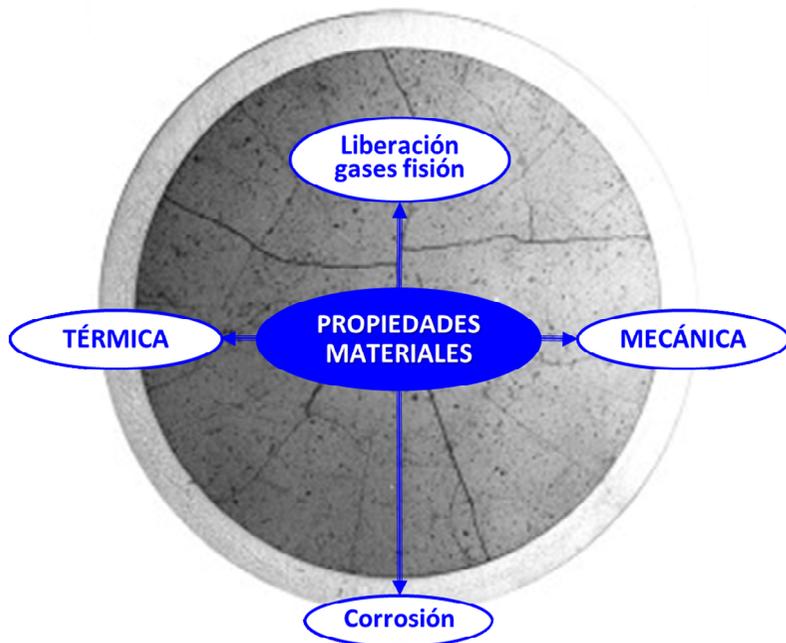
Introducción

Motivación M(AT)2F



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



Introducción

Objetivo M(AT)2F



Desarrollo de herramientas predictivas fiables del comportamiento de ATFs evolutivos mediante las cuales diseñar metodologías de análisis de seguridad

Alcance:

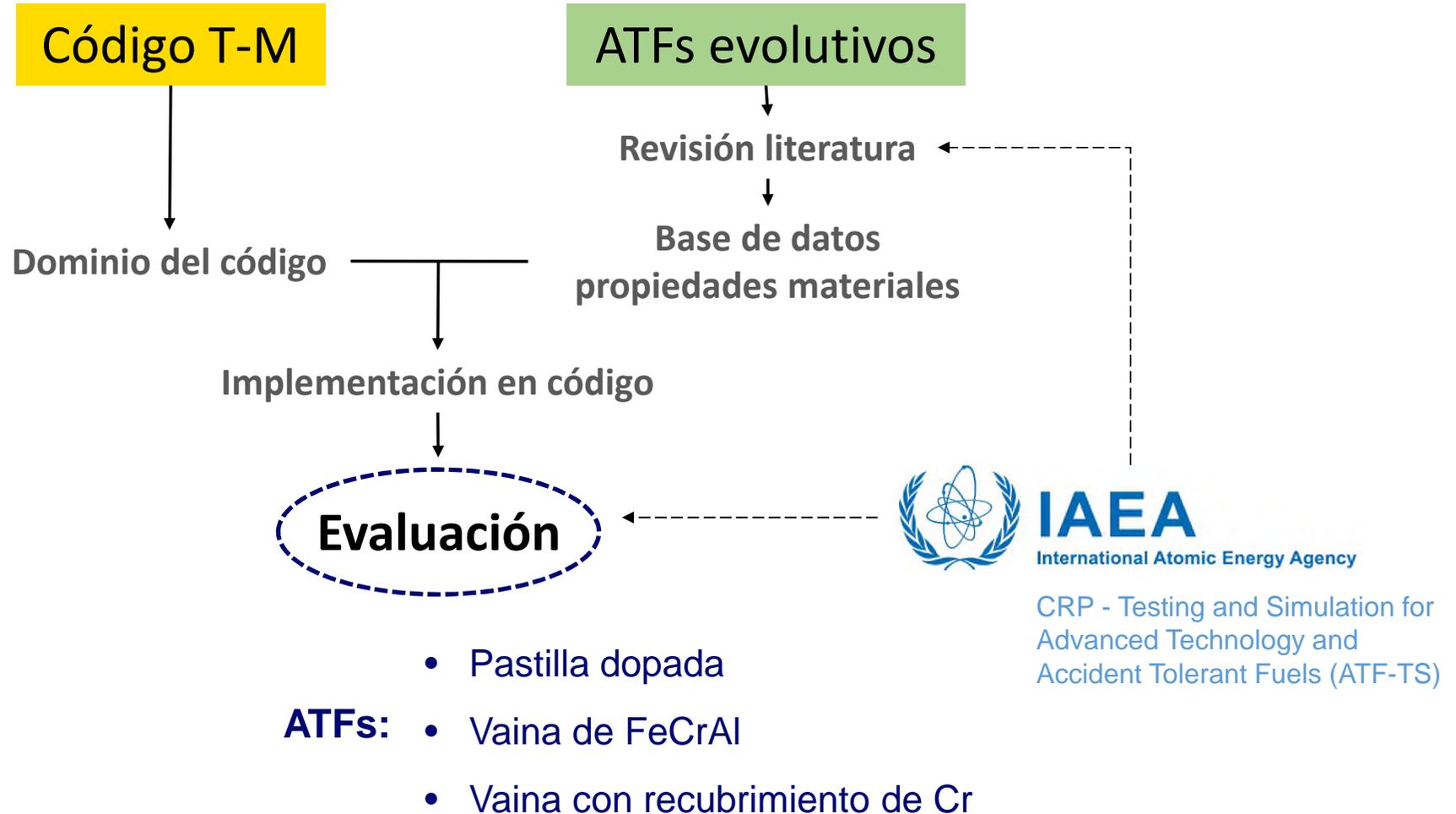
- Pastilla dopada con Cr_2O_3 / Vaina de FeCrAl / Vaina con recubrimiento de Cr
- Condiciones de operación normal / Accidentes base de diseño (LOCA, RIA)
- Códigos FRAPCON/FRAPTRAN/FAST (NRC) & DAKOTA (herramienta estadística)

Pilares fundamentales:

- 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

Introducción

Objetivo M(AT)2F



IAEA
International Atomic Energy Agency

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

02



PLAN DE TRABAJO

Plan de trabajo

Fases



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



- **Año 1: Estado del arte de modelado termo-mecánico de ATFs evolutivos**
 - Construcción de bases de datos representativas
 - 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

03



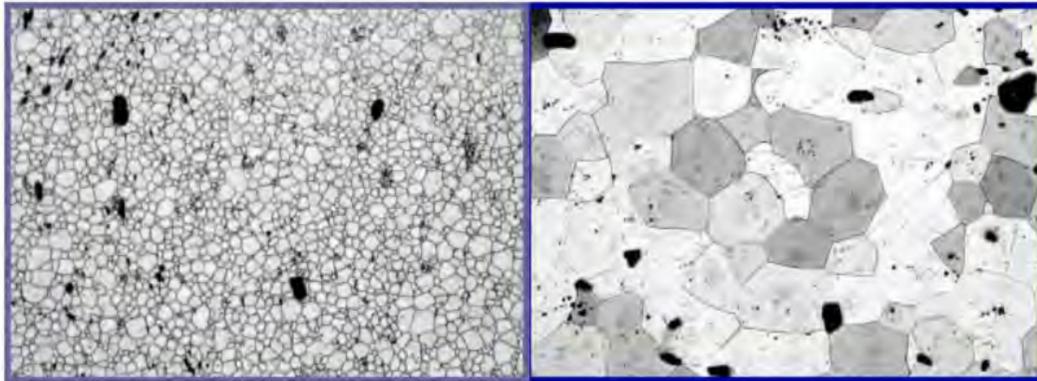
PROGRESO

Progreso

Estado del arte – Pastilla dopada

Cr_2O_3 (<1 wt%) → Mayor tamaño de grano → Mejoras:

- Retención de gases de fisión
- Viscoplasticidad



Standard UO_2

Cr-doped UO_2

Massih (2014)

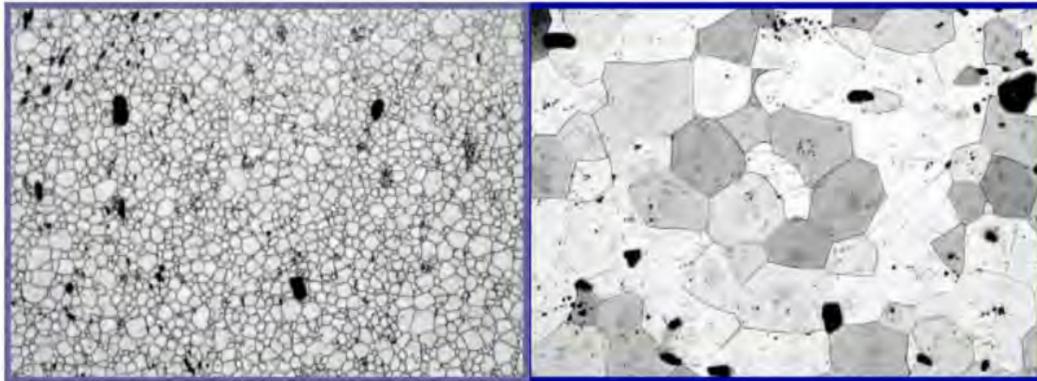


Progreso

Estado del arte – Pastilla dopada

Cr_2O_3 (<1 wt%) → Mayor tamaño de grano → Mejoras:

- Retención de gases de fisión
- Viscoplasticidad



Standard UO_2

Cr-doped UO_2

Massih (2014)



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



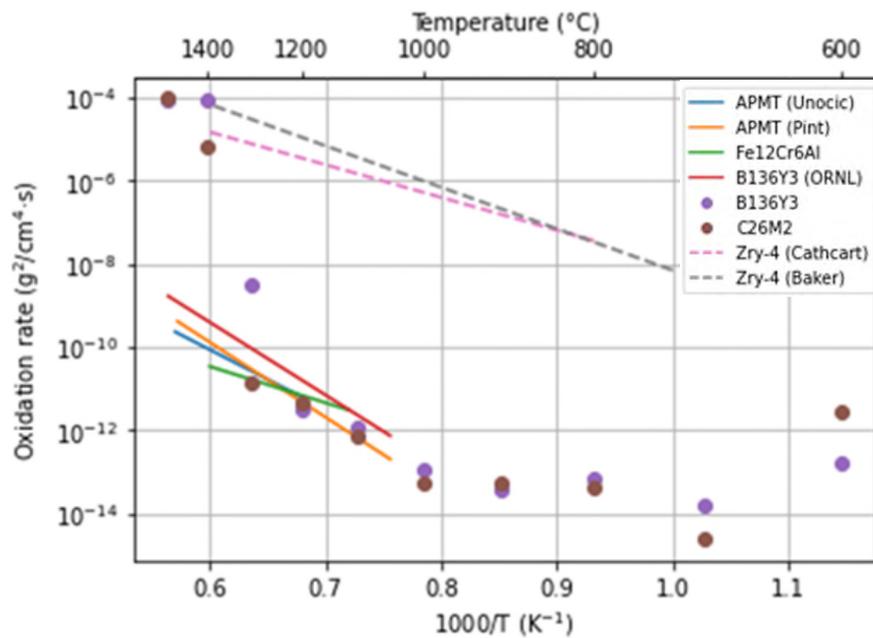
Database	Reference
Grain size ↑	50-60 μm Fuglesang (2016)
Irradiation swelling ↑	0.062→0.068% per GWd/tU Fuglesang (2016)
Densification ↓	1%→0.15% Fuglesang (2016)
Fission gas diffusivity ↑	Cooper et al. (2021)
Viscoplasticity ↑	Massih (2014)

Progreso

Estado del arte – Vaina de FeCrAl

Acero avanzado → Mejoras:

- Resistencia a oxidación

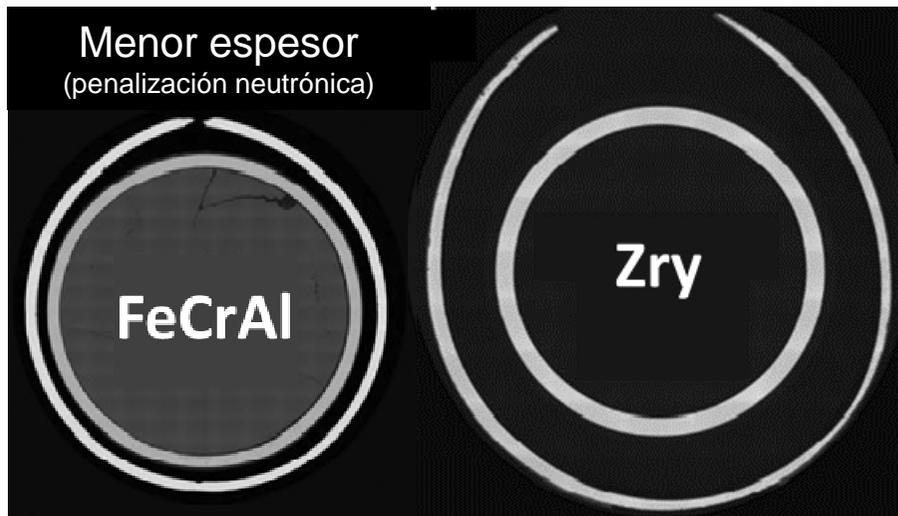


Progreso

Estado del arte – Vaina de FeCrAl

Acero avanzado → Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Bell et al. (2021)

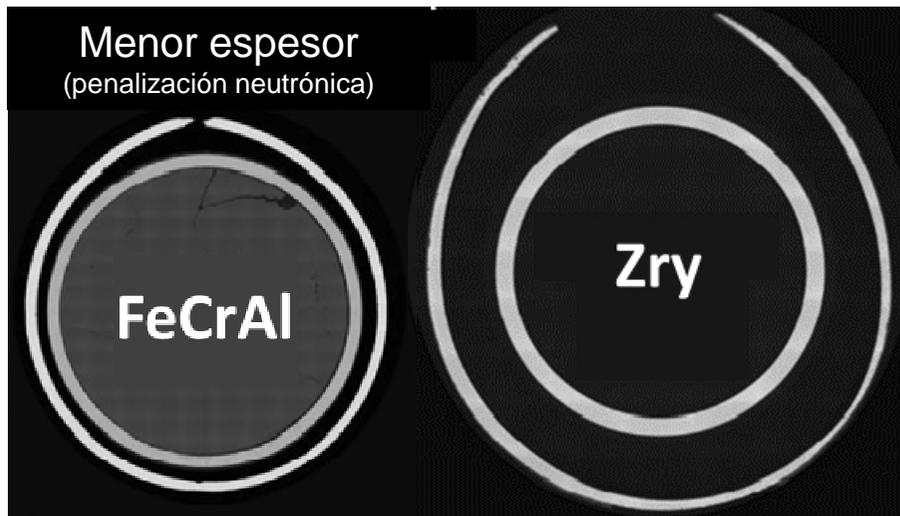


Progreso

Estado del arte – Vaina de FeCrAl

Acero avanzado → Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Bell et al. (2021)



Database (models)	Alloy	Reference
Thermal conductivity \approx	C35M	Field et al. (2018)
Thermal expansion \uparrow	C35M	Field et al. (2018)
Specific heat capacity \uparrow	C35M	Field et al. (2018)
Young's modulus \uparrow	Generalized	Thompson et al. (2015)
Poisson's ratio \approx	Generalized	Thompson et al. (2015)
Irradiation creep \downarrow	C35M	Terrani et al. (2016)
Instantaneous plasticity \uparrow	C26M	CIEMAT from Bell et al. (2021)
High-temperature creep \downarrow	Generalized	Field et al. (2018)
Burst stress \uparrow	C26M	CIEMAT from Bell et al. (2021) & Garrison et al. (2022)
High-temp. oxidation \downarrow	C26M	CIEMAT from Kim et al. (2022)

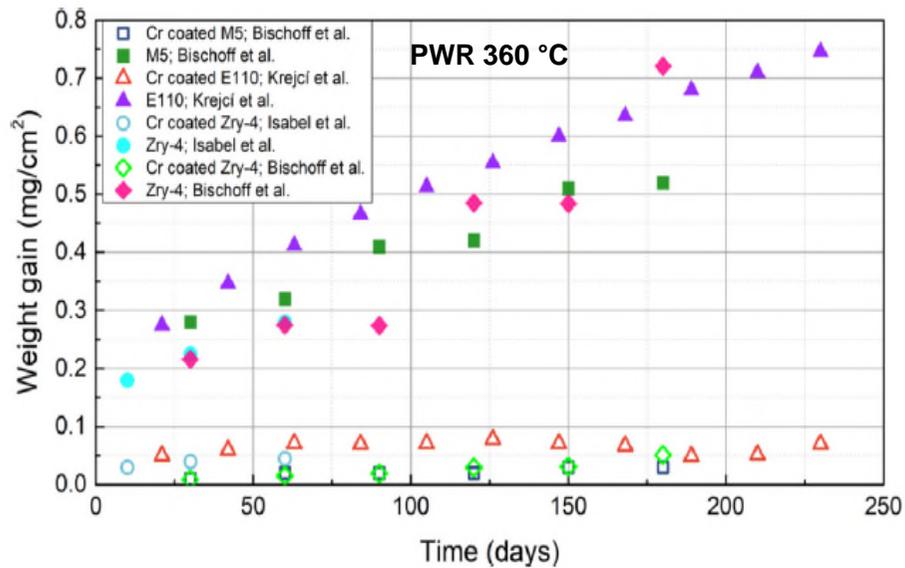
**Escasez de datos de material irradiado
en literatura abierta**

Progreso

Estado del arte – Vaina con recubrimiento

Cr (baja penalización neutrónica si $< 20 \mu\text{m}$) → Mejoras:

- Resistencia a oxidación



Yang (2022)

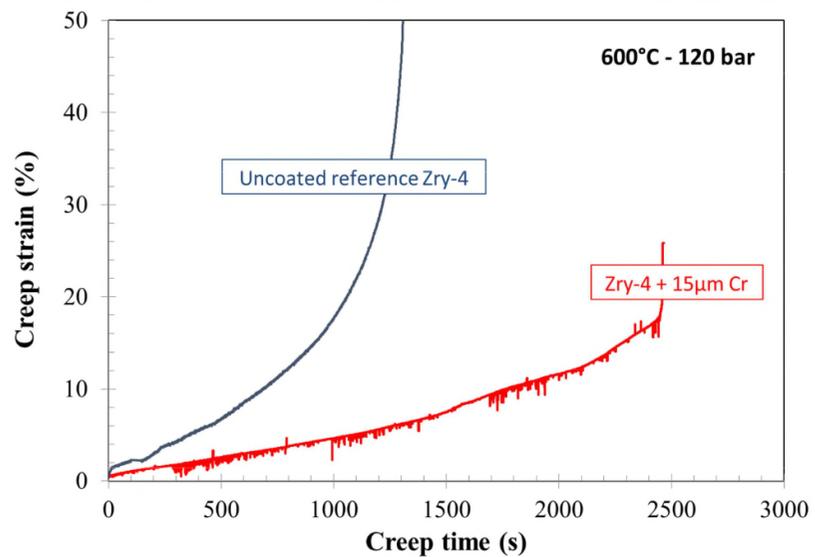


Progreso

Estado del arte – Vaina con recubrimiento

Cr (baja penalización neutrónica si $< 20 \mu\text{m}$) → Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Brachet et al. (2016)



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

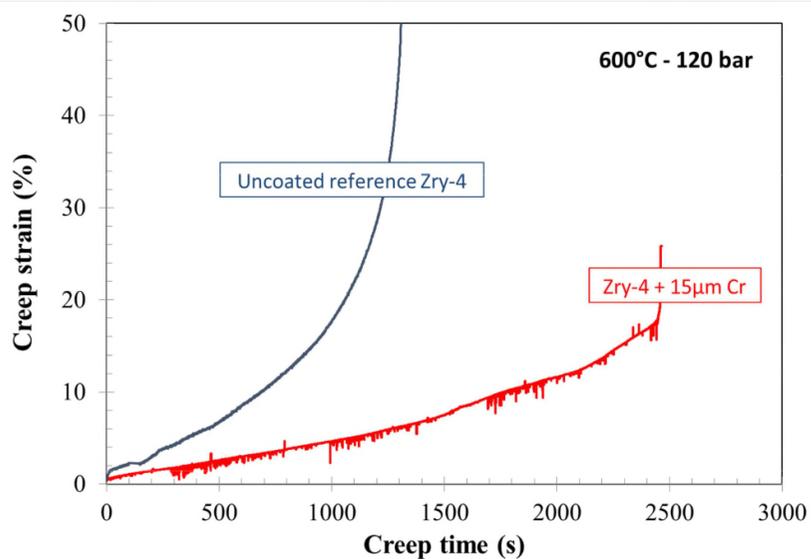


Progreso

Estado del arte – Vaina con recubrimiento

Cr (baja penalización neutrónica si $< 20 \mu\text{m}$) → Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Brachet et al. (2016)



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Database (models)	Reference
Thermal conductivity ↑	Holzwarth et al. (2002)
Thermal expansion ≈	Holzwarth et al. (2002)
Specific heat capacity ↑	Holzwarth et al. (2002)
Young's modulus ↑	Wagih et al. (2018)
Poisson's ratio ≈	Simmons et al. (1971)
Irradiation creep ≈	Mulligan et al. (2024)
High-temperature creep ↓	Wagih et al. (2018)
Burst stress ↑	CIEMAT from Sweet (2022), Kane (2023), Ridley (2023), Hazan (2021), Bell (2022)
High-temperature oxidation ↓	Brachet et al. (2020)

**Escasez de datos de material irradiado
en literatura abierta**

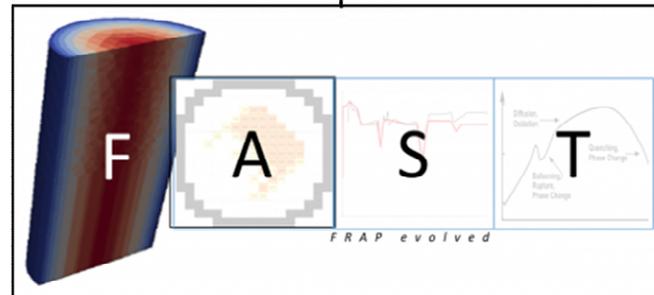
Revisión / Extensión / Evaluación

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)

Revisión / Extensión / Evaluación

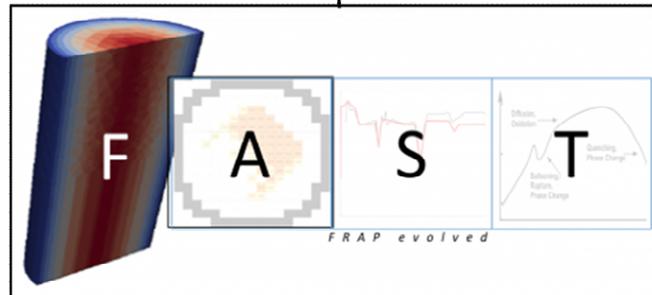
No simulan ATF's

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

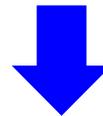
No simulan ATF's

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

Revisión / Extensión / Evaluación

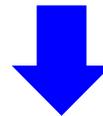
No simulan ATF's

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



Progreso

Extensión FRAPCON/FRAPTRAN



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



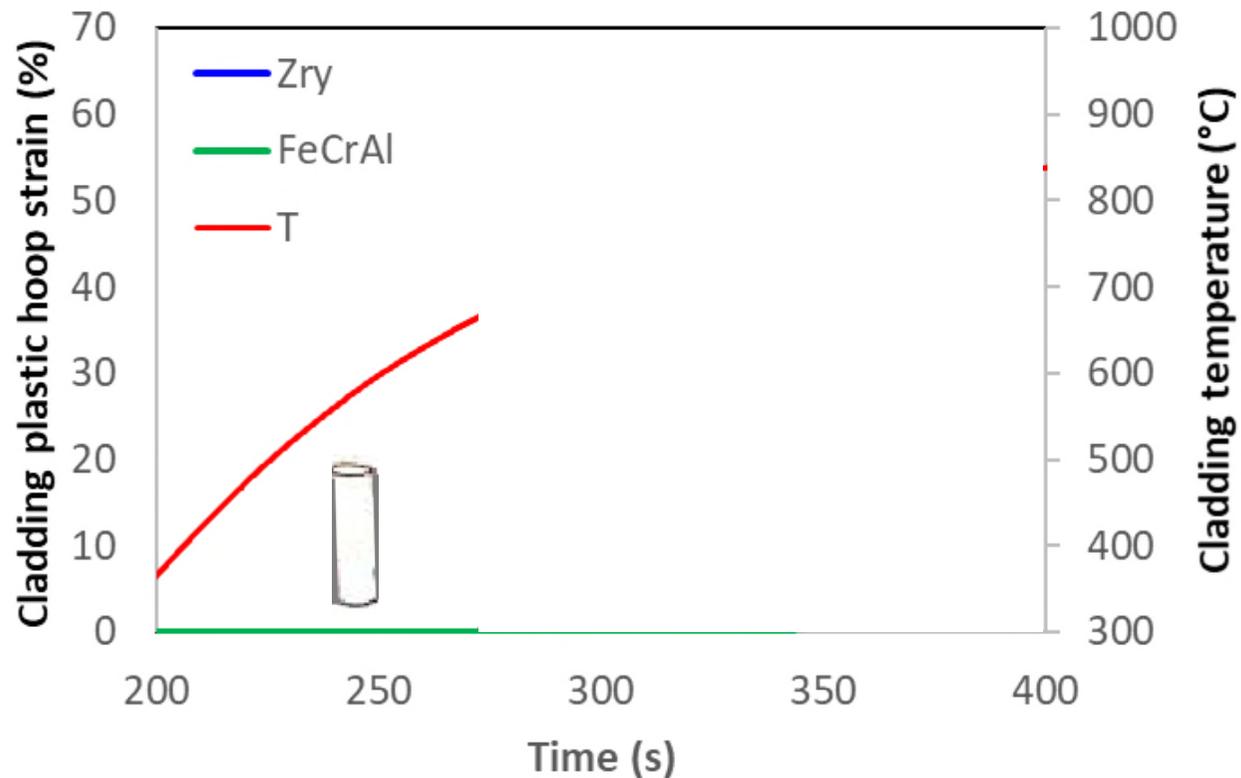
Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

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



Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

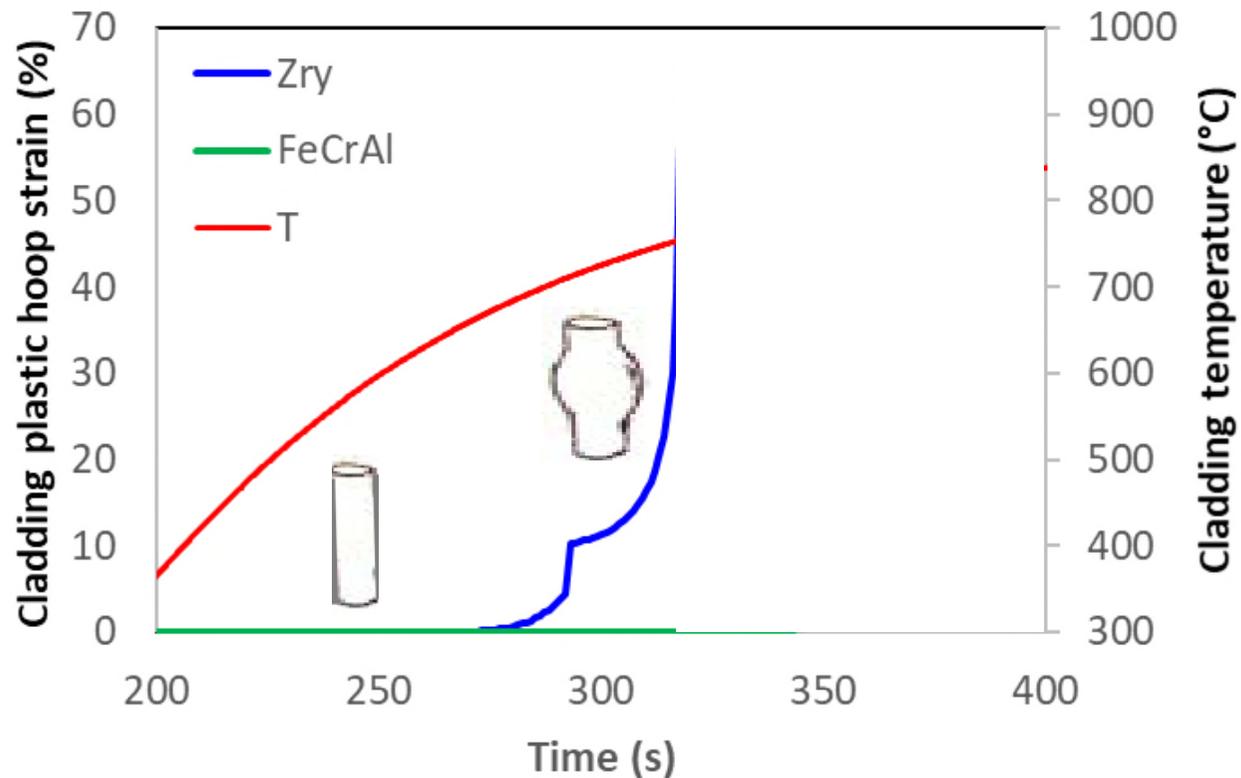
Simulación ensayo Halden - IFA-650.10 (barra PWR, 61 GWd/tU)





Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

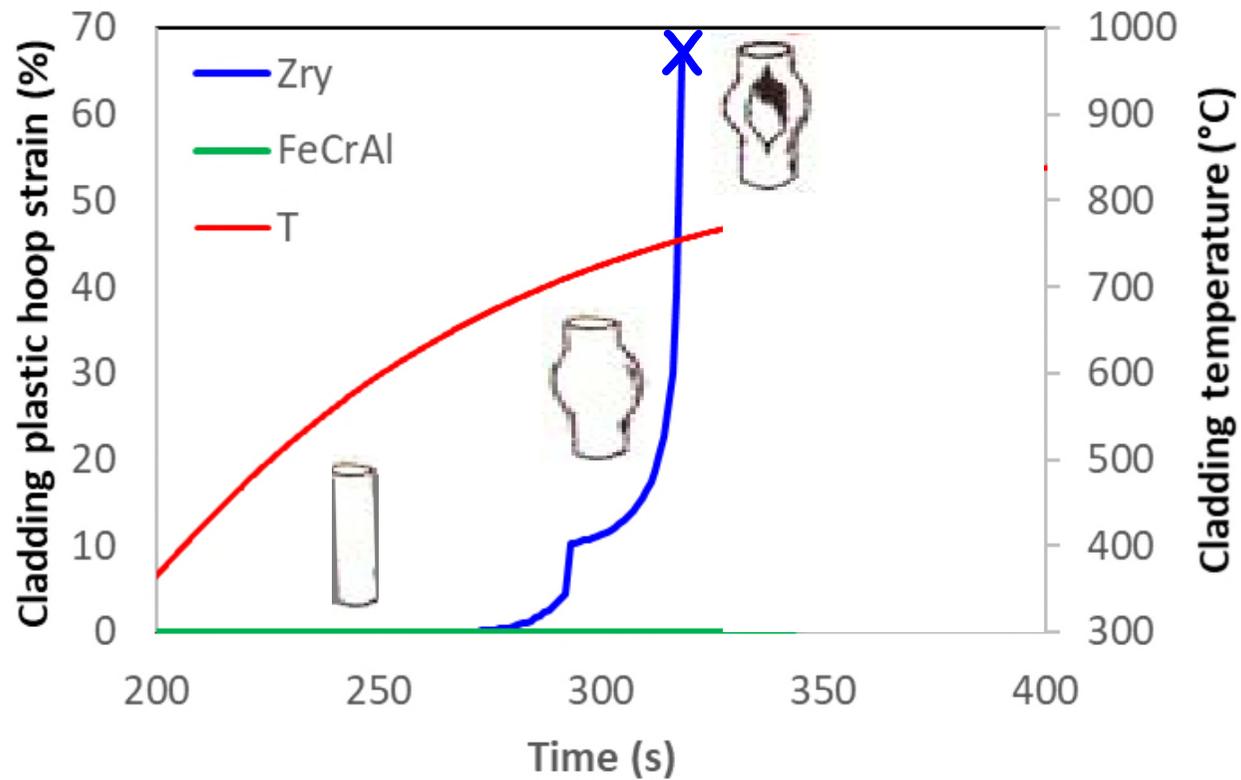
Simulación ensayo Halden - IFA-650.10 (barra PWR, 61 GWd/tU)





Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

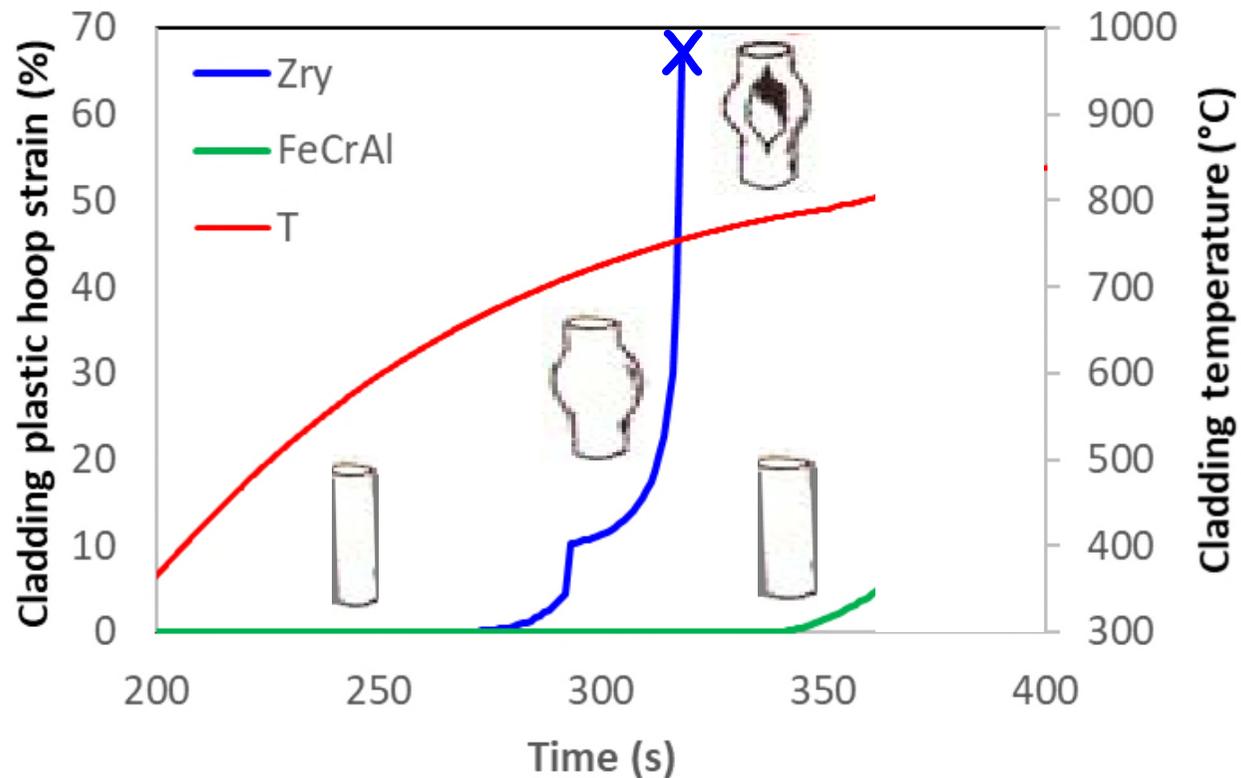
Simulación ensayo Halden - IFA-650.10 (barra PWR, 61 GWd/tU)





Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

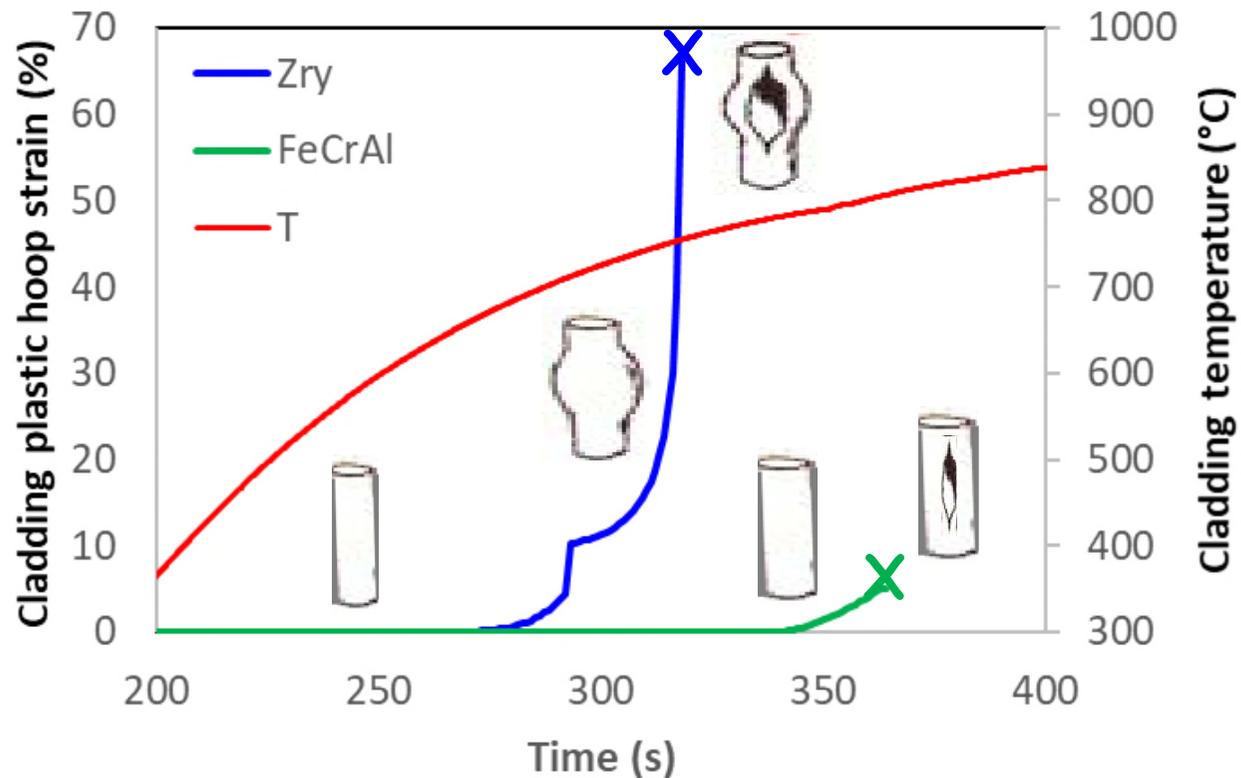
Simulación ensayo Halden - IFA-650.10 (barra PWR, 61 GWd/tU)





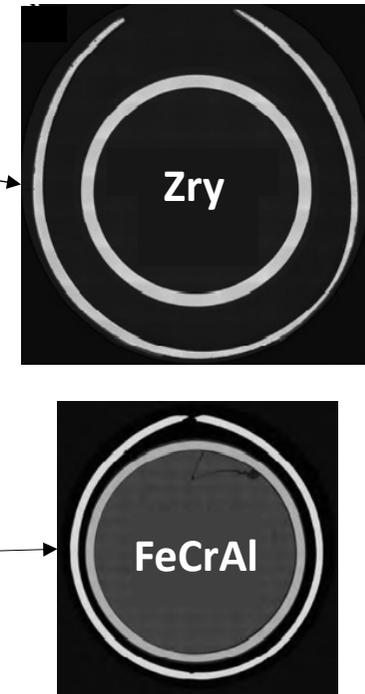
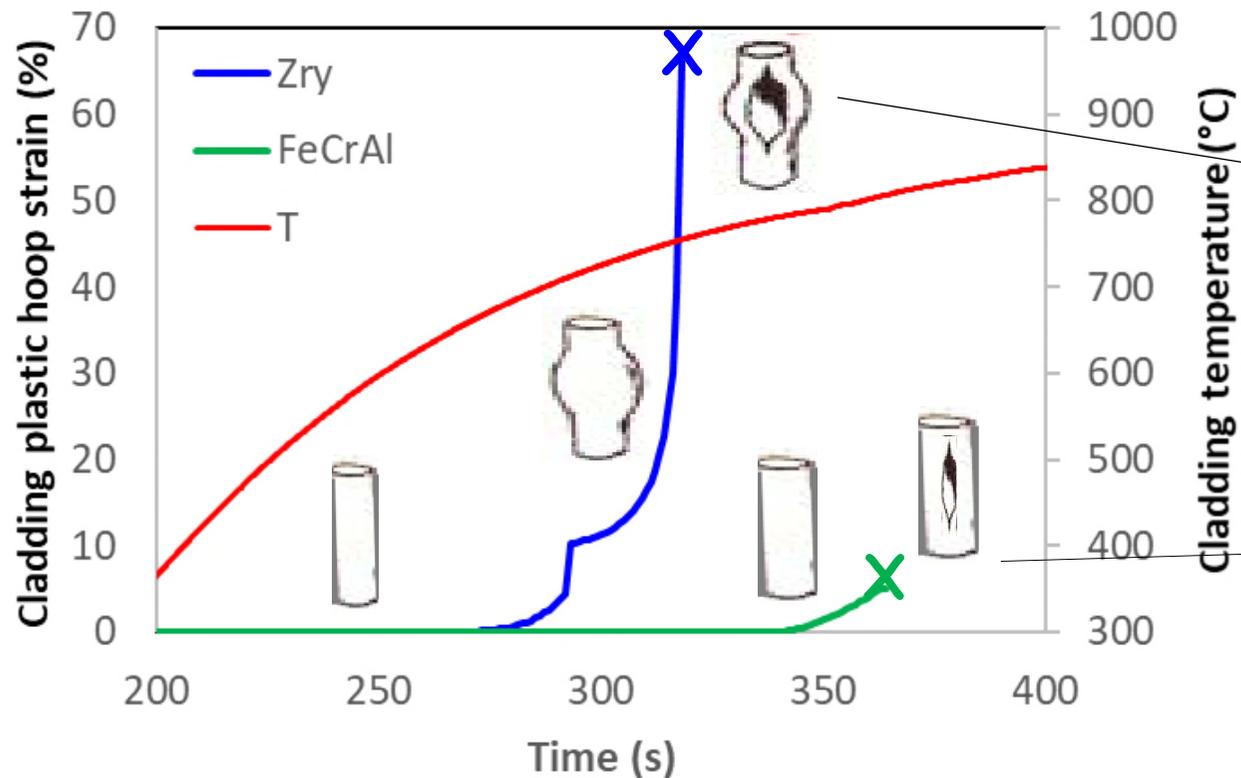
Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

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



Evaluación mecánica vaina FeCrAl – LOCA

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



Bell et al. (2021)

04



SÍNTESIS

- Estado del arte de modelado T-M de ATFs evolutivos → **Hecho (2023)**
- Extensión/evaluación de FRAPCON/FRAPTRAN → **En curso (2024)**
- Metodología de análisis → Año 3 (2025)

Referencias



- Aragón, P., Feria, F., and Herranz, L.E., 2022. Modelling FeCrAl cladding thermo-mechanical performance. Part I: Steady-state conditions. Progress in Nuclear Energy, Volume 153.
- Aragón, P., Feria, F., and Herranz, L.E., 2023. Modelling FeCrAl cladding thermo-mechanical performance. Part II: Comparative analysis with Zircaloy under LOCA conditions. Progress in Nuclear Energy, Volume 163.
- Aragón, P., Feria, F., and Herranz, L.E., 2023. Progress on modelling the thermo-mechanical performance of accident-tolerant fuels. The 2023 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Xi'an (China).
- P. Aragón, F. Feria, and L.E. Herranz, 'Progress in modelling advanced technology fuels: The CIEMAT footprint', Type: Oral, 48ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, Toledo, Oct 2023. Best paper award in the Fuel Track of the Spanish Nuclear Society.
- F. Feria, P. Aragón, and L.E. Herranz, 'Assessment of cladding ballooning during DBA-LOCAs with FRAPTRAN', Annals of Nuclear Energy, vol. 195, 2024.
- Aragón, P., Feria, F., Herranz, L.E., Schubert, A., and Van Uffelen, P., 2024. Enhancing cladding mechanical modelling during DBA/LOCA accidents with FRAPTRAN: The TUmech one-dimensional model. Progress in Nuclear Energy, under review.



Gracias por vuestra atención

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