GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES

Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

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

Coordinador CSN: Enrique Vela

Jornadas I+D CSN
18 junio, 2026, Madrid

Índice

01 Introducción

02 Principales resultados

03 Síntesis

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES

Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

01

INTRODUCCIÓN

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)

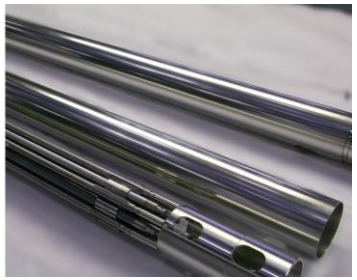
Accident Tolerant Fuels

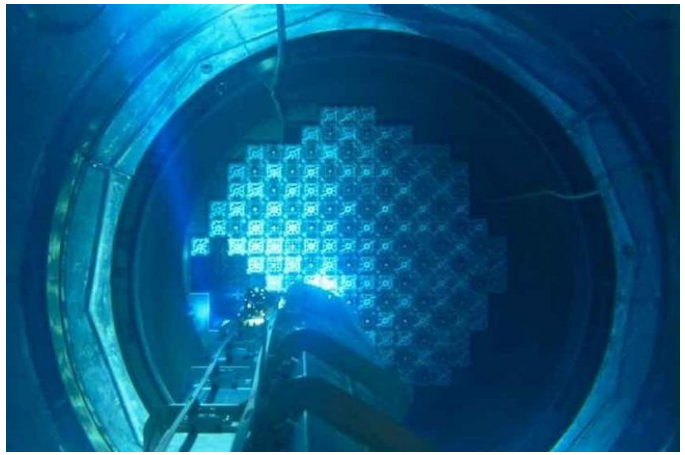


Advanced Technology Fuels









Introducción

Contexto

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



Categoria	Vaina	Pastilla
Convencional	Aleación Zr	UO_2
Evolutivo ("corto plazo")	Recubrimiento de Cr Acero avanzado (FeCrAl)	UO_2 dopado (Cr_2O_3)
Revolucionario ("largo plazo")	SiC/SiC Metales refractarios	UO_2 (U_3Si_2) TRISO (UO_2 / UCO)

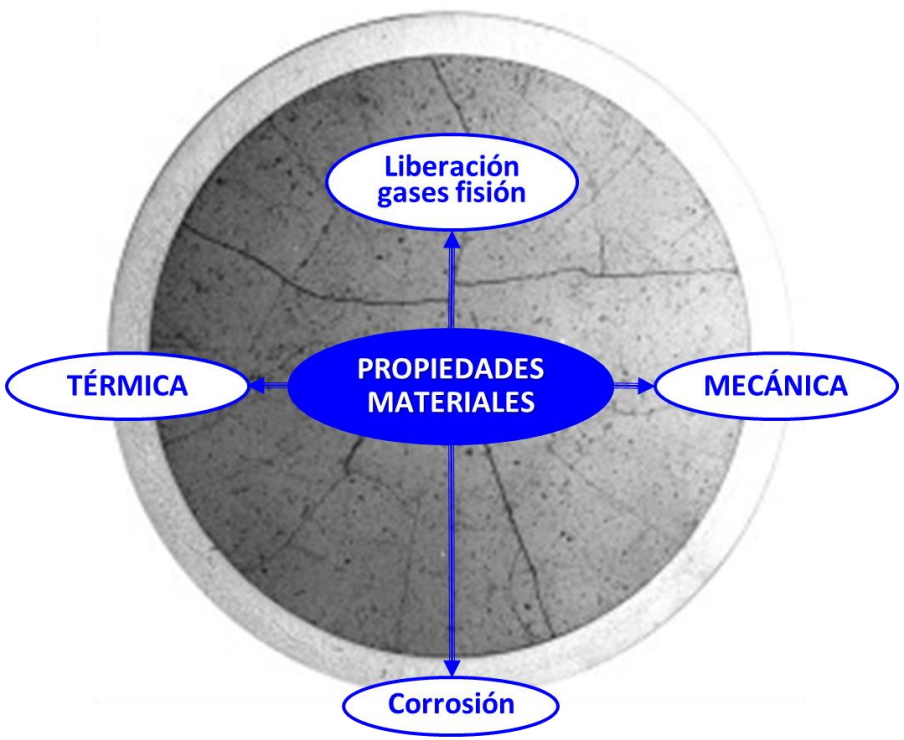
Introducción

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 potencialmente integrables en metodologías de análisis de seguridad

Alcance:

- **Materiales:** **Pastilla de combustible:** UO_2 dopado con Cr_2O_3
  Vaina: FeCrAl / Zry - Cr
- **Condiciones de contorno**: operación normal / DBA (LOCA, RIA)
- **Códigos**: FRAPCON/FRAPTRAN/FAST (NRC) (& DAKOTA)

IAEA International Atomic Energy Agency

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

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

Introducción

Desarrollo temporal

- **<u>Año 1</u>: Estado del arte de modelado termo-mecánico de ATFs evolutivos**
  - Construcción de bases de datos
  - Desarrollo y/o mejora de modelos termo-mecánicos

- **<u>Año 2</u>: Extensión de códigos termo-mecánicos FRAPCON/FRAPTRAN/FAST**
  - Adaptación de desarrollos y/o mejoras de modelos
  - Verificación/Validación (BEPU)

- **<u>Año 3</u>: Metodología de análisis de seguridad**
  - Selección de metodología y adaptación a códigos extendidos
  - Aplicación a escenarios postulados

02

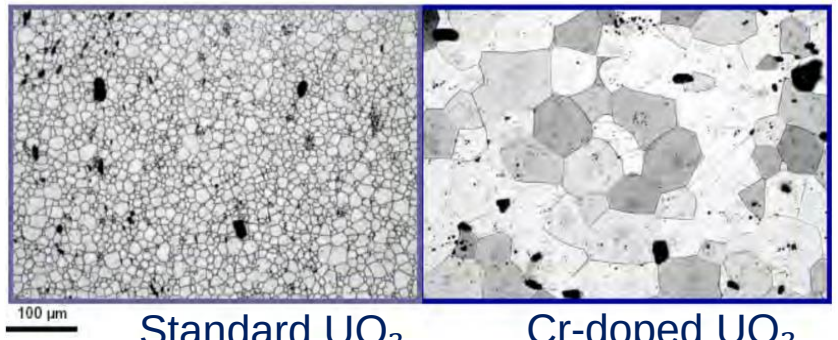
PRINCIPALES RESULTADOS

Principales resultados

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)

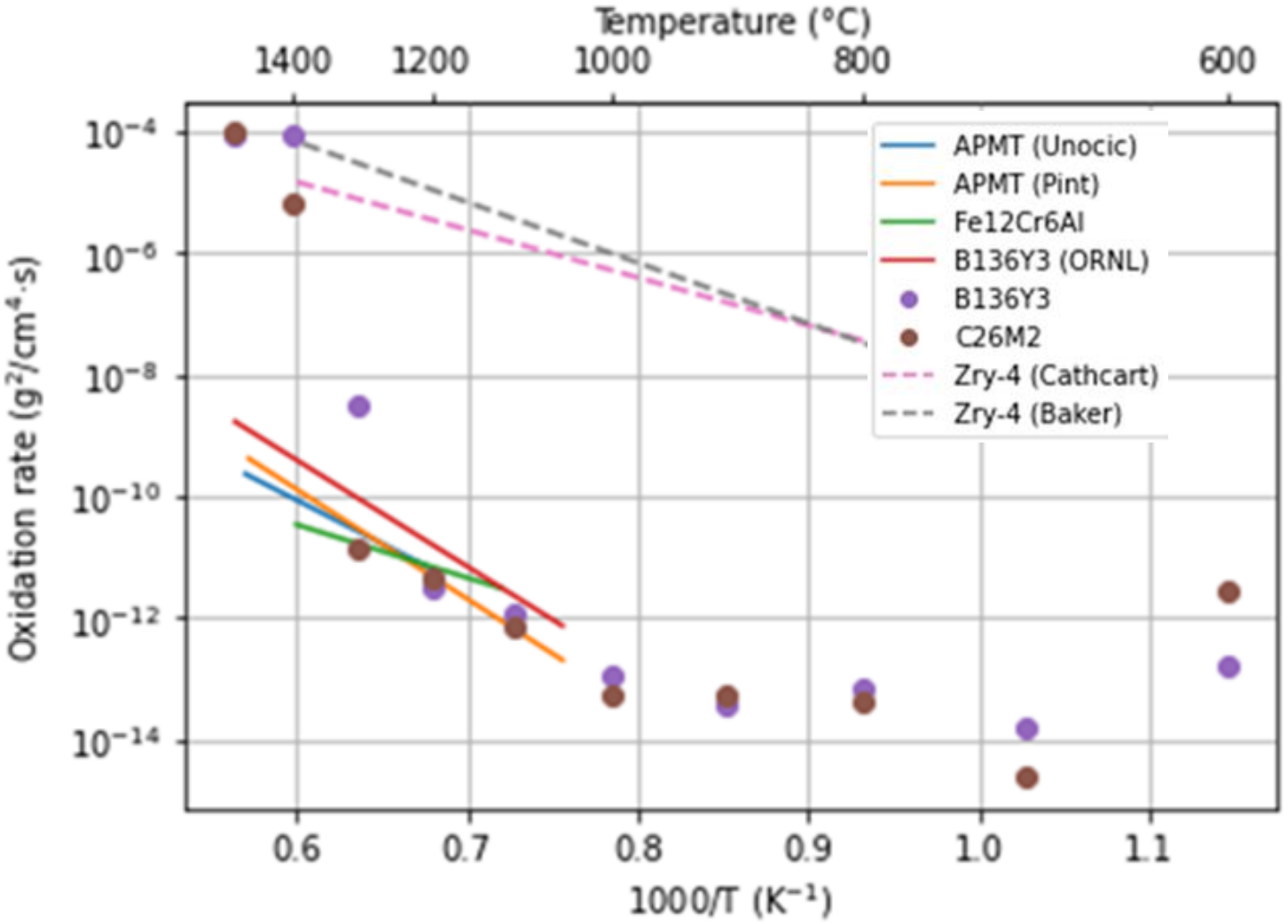
Database	Reference
Grain size ↑	50-60 µm Fuglesang (2016)
Irradiation swelling ↑	0.062→0.068% per GWd/tU Fuglesang (2016)
Densification ↓	1%→0.15% Fuglesang (2016)
Fission gas retention ↑	Cooper et al. (2021)
Viscoplasticity ↑	Massih (2014)

Principales resultados

Estado del arte – **Vaina de FeCrAl**

Acero avanzado → Mejoras:

- Resistencia a oxidación

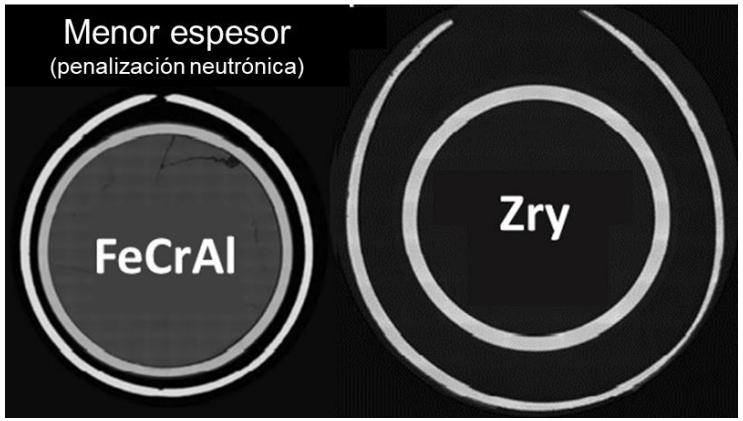


Principales resultados

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)

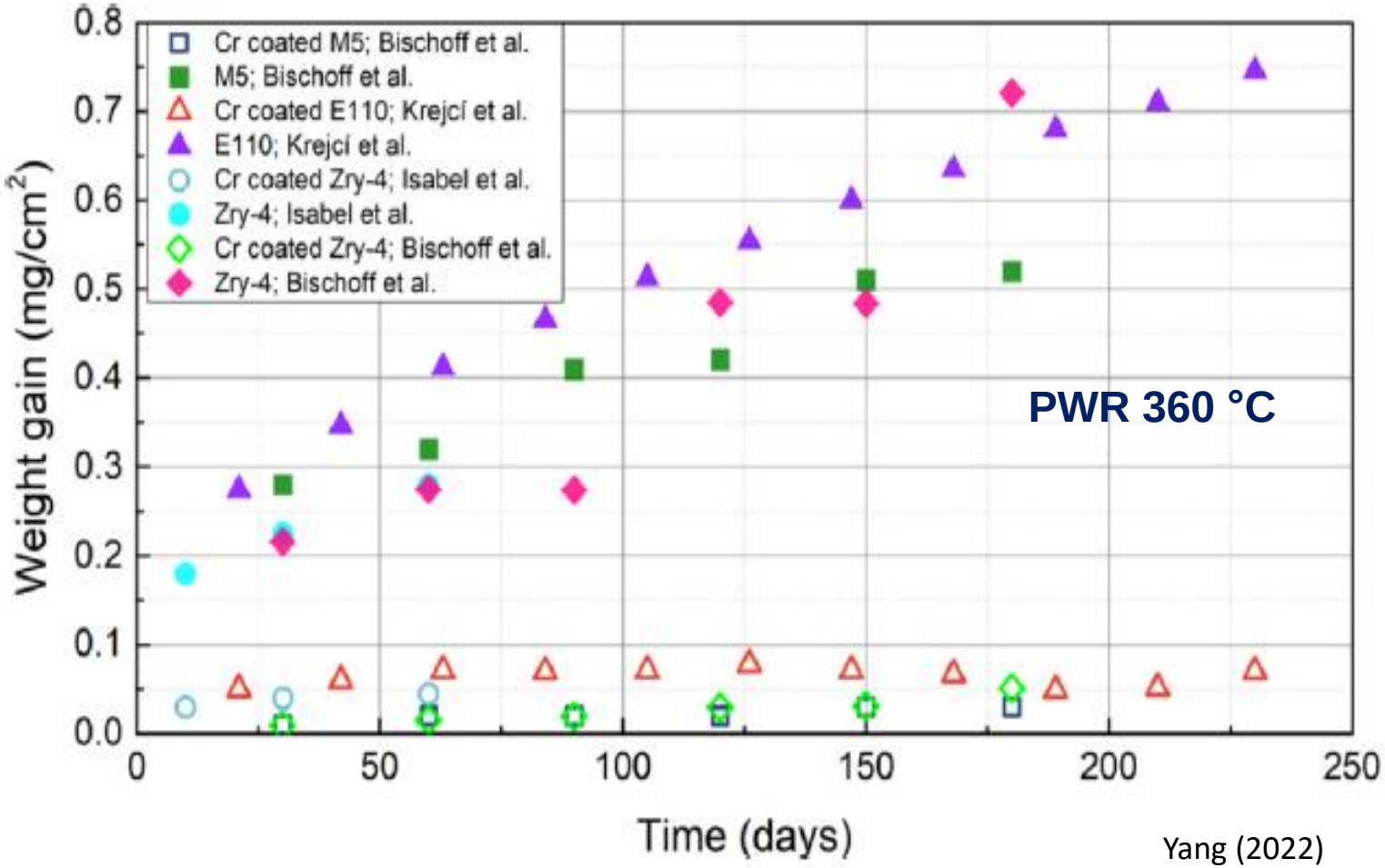
Material irradiado!

Principales resultados

Estado del arte – **Vaina con recubrimiento**

Cr (Δ< 20 μm) → Mejoras:

- Resistencia a oxidación



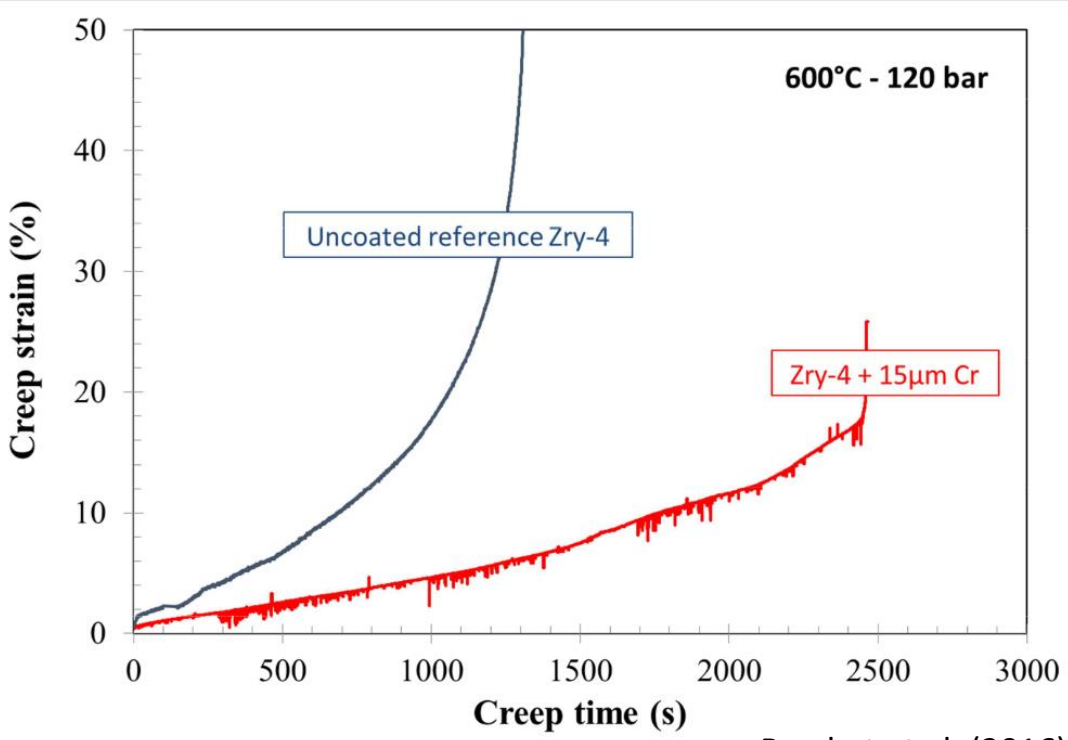
Yang (2022)

Principales resultados

Estado del arte – **Vaina con recubrimiento**

Cr (Δ< 20 μm) → Mejoras:

- Resistencia a oxidación
- Resistencia mecánica



Brachet et al. (2016)

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-T oxidation ↓	Brachet et al. (2020)

Material irradiado!

Principales resultados

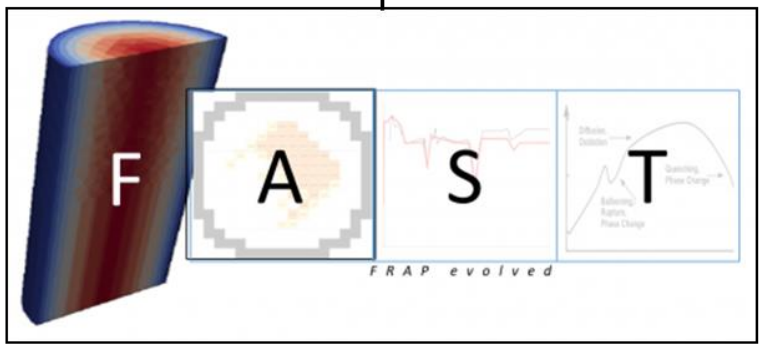
Códigos termo-mecánicos

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)



Fuel Analysis under Steady-state and Transients
Estacionario/Transitorio (operación normal, rampas / RIA, LOCA)

Simula ATFs, pero no validado y sin acceso a código fuente

Principales resultados

Códigos termo-mecánicos

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

Principales resultados

Códigos termo-mecánicos

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

Evaluación

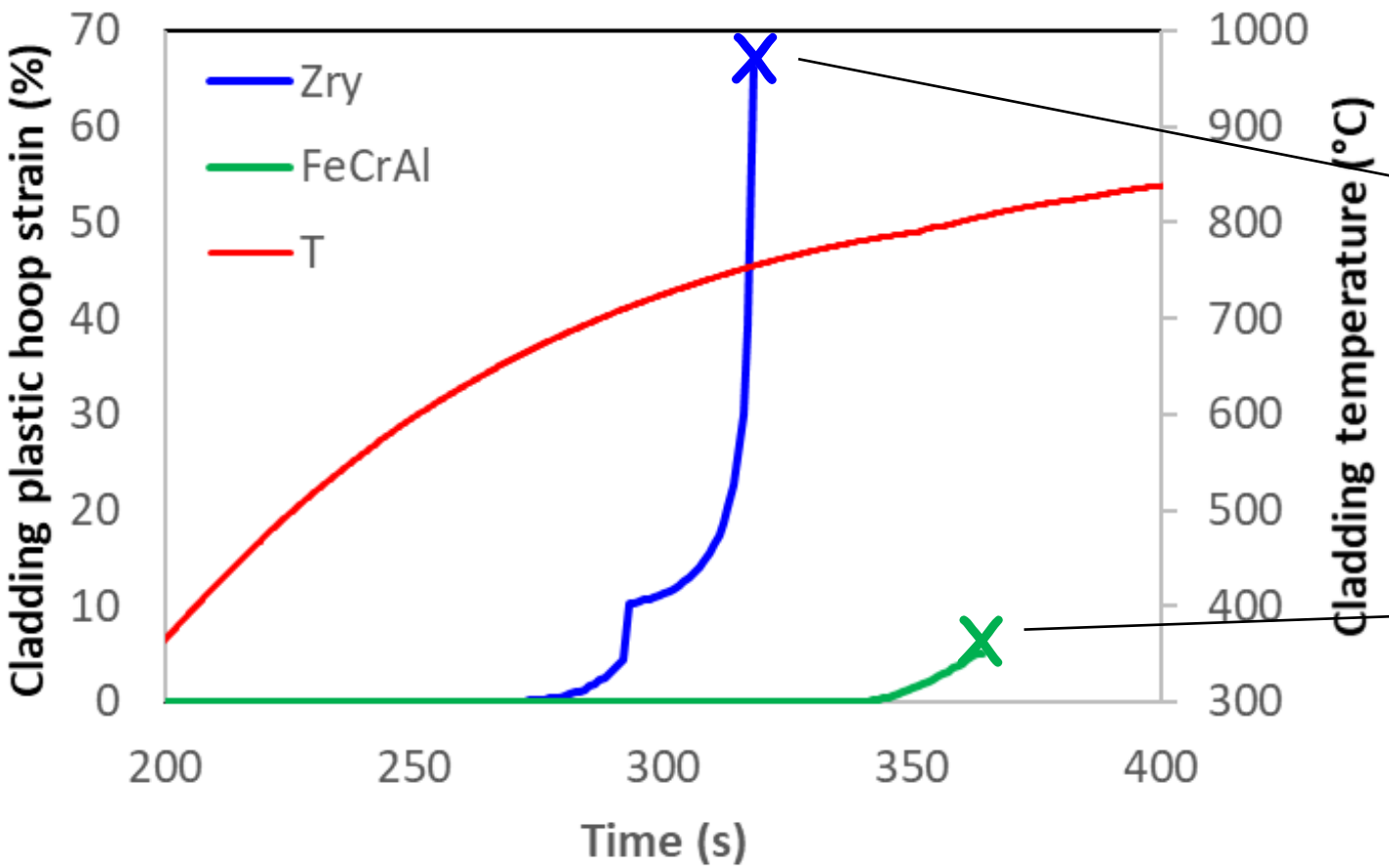
- Operación
- DBAs

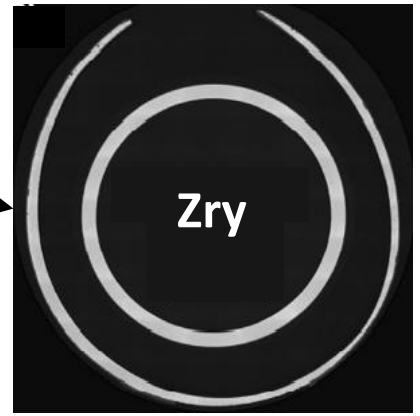
Principales resultados

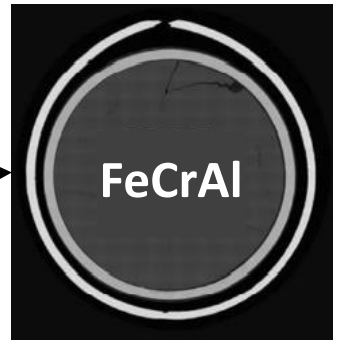
Evaluación FRAPCON\FRAPTRAN

Vaina FeCrAl - LOCA

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







Bell et al. (2021)

Principales resultados

Extensión FRAPCON\FRAPTRAN\TUmech

Vaina cromada. Aproximaciones de modelado:

- Propiedades efectivas
- **Modelado multicapa de sustrato y recubrimiento** → **FRAPTRAN - TUmech**

(Modelo mecánico TU)

Propiedades Cr:

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

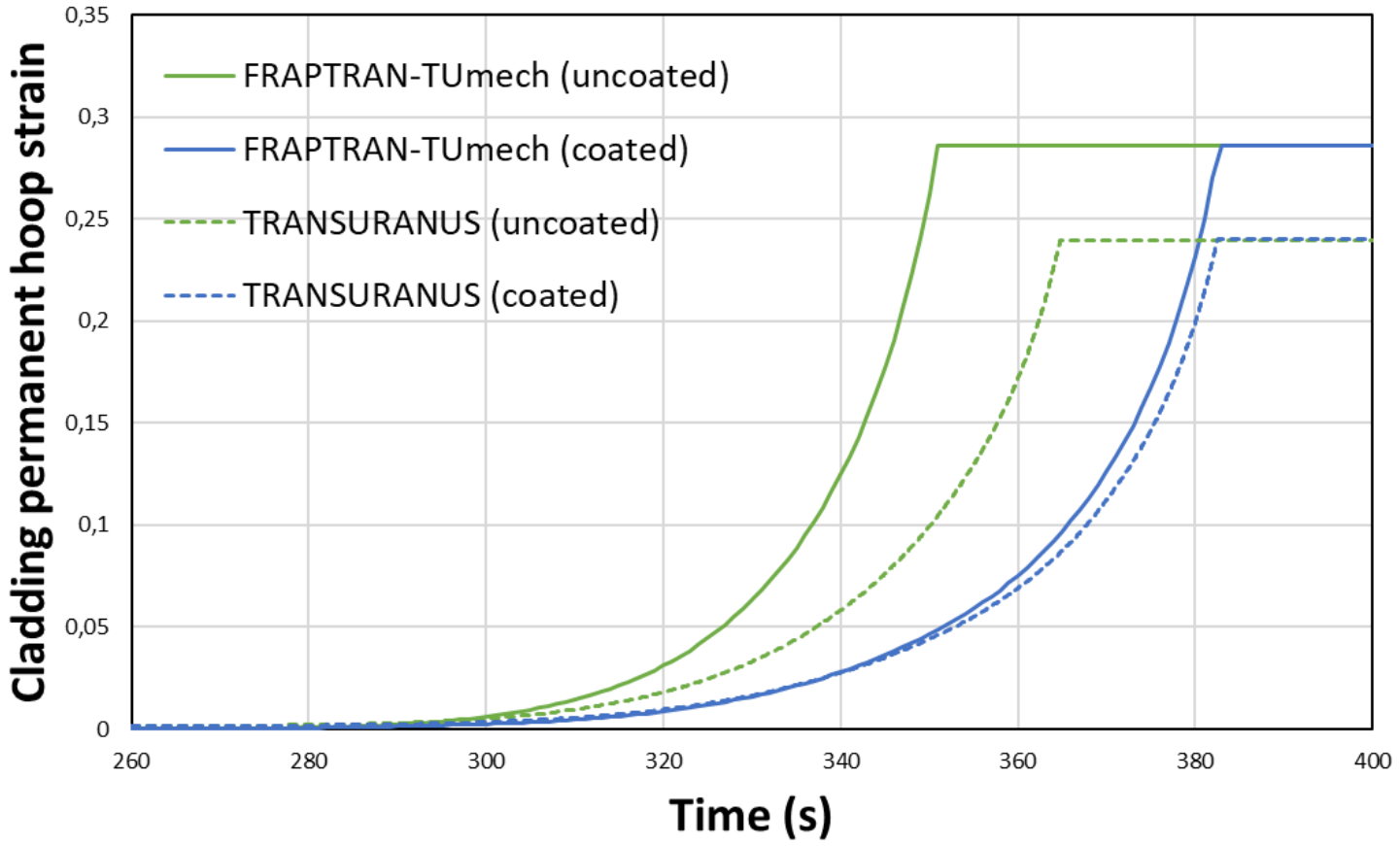
+ Modelo de oxidación a alta temperatura

Principales resultados

Evaluación FRAPCON\FRAPTRAN\TUmech

Evaluación vaina cromada – LOCA

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



Principales resultados

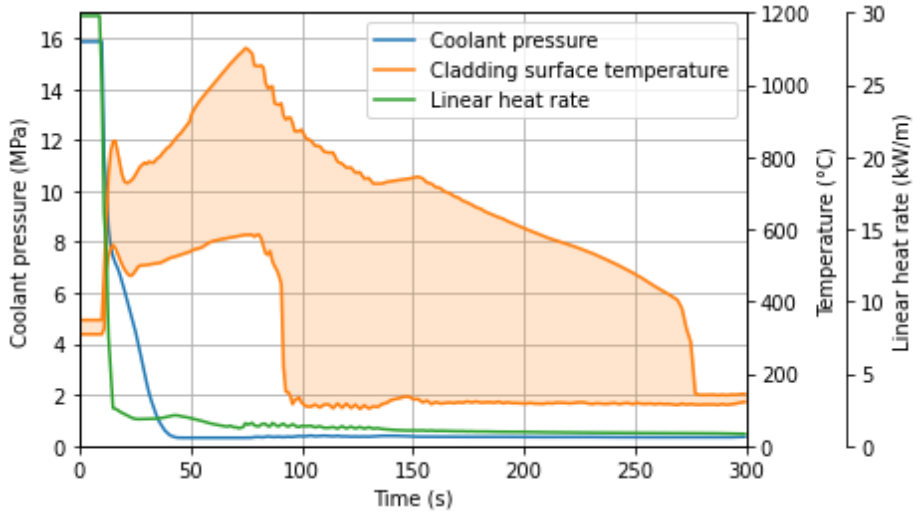
Metodología de evaluación de seguridad

IAEA International Atomic Energy Agency

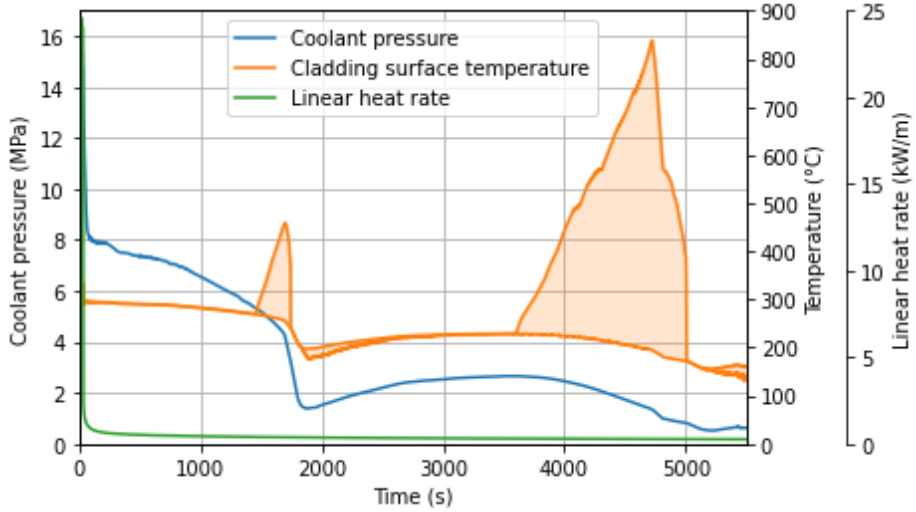
Respuesta T-M de barra más caliente en núcleo

Scenario	DBA/LB-LOCA	DEC-A/SB-LOCA
Pellet		
Material	UO_2	
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^2·s]	3101.38	

DBA. Double-ended LB-LOCA



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



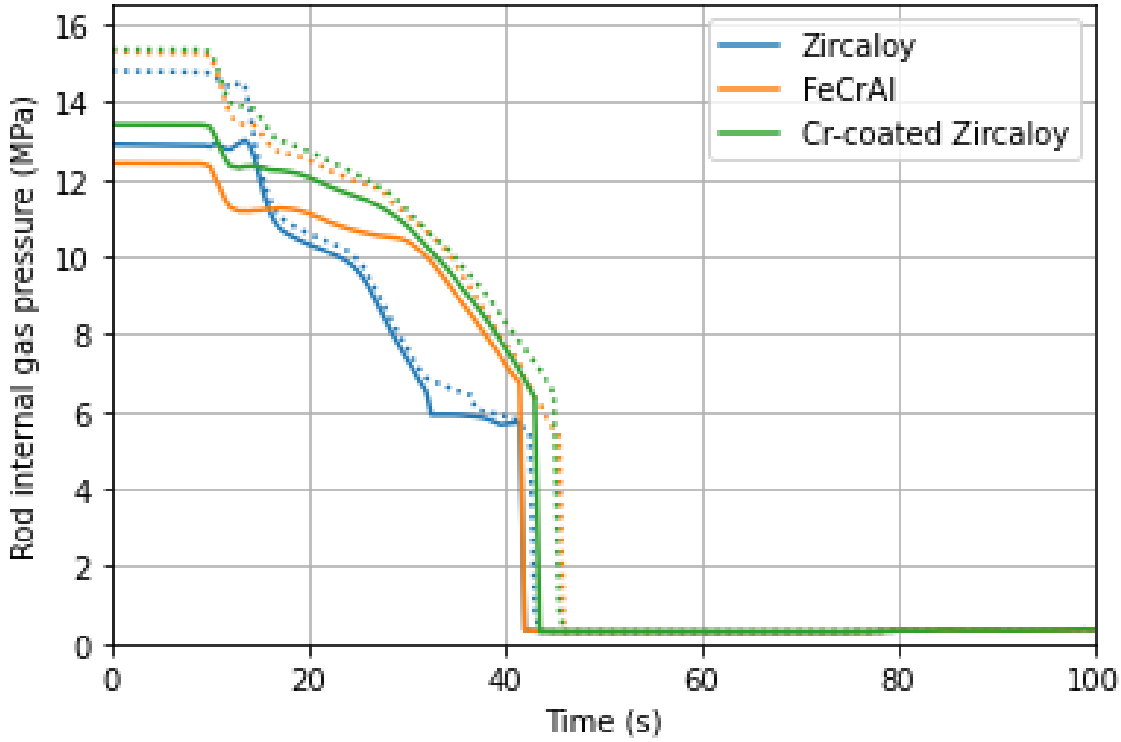
Principales resultados

Metodología de evaluación de seguridad

Predicción BEPU

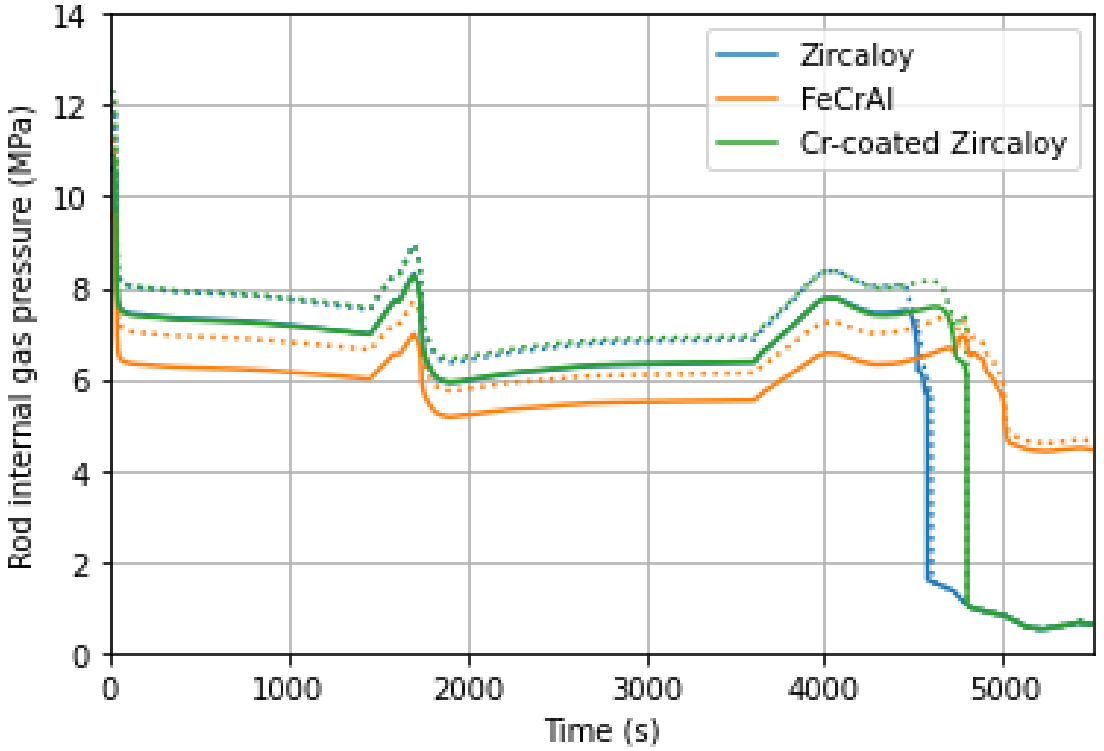
Mejor estimación (línea continua) + Incertidumbre (línea discontinua)

DBA/LB-LOCA



No diferencias significativas en tiempo de reventado

DEC-A/SB-LOCA



- Ligero retraso en fallo (vaina cromada).
- FeCrAl no sufre fallo.

04

SÍNTESIS

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.

Referencias

- 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. Queral, 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.

Tesis Doctoral

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES

Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

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

Pau Aragón

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

E.T.S.I. Industriales (UPM)

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