



<https://ant.upc.edu>

## Análisis de escenarios DEC con reinundación de núcleo para combustible ATF cromado

Jordi Freixa Terradas  
[terradas@upc.edu](mailto:terradas@upc.edu)

[jordi.freixa-](mailto:jordi.freixa-)

Marina Pérez Ferragut

[marina.perez@upc.edu](mailto:marina.perez@upc.edu)

Víctor Martínez Quiroga

[victor.martinez.quiroga@upc.edu](mailto:victor.martinez.quiroga@upc.edu)

Adrián González Briones

[adrian.gonzalez.briones@upc.edu](mailto:adrian.gonzalez.briones@upc.edu)

Iván Bravo

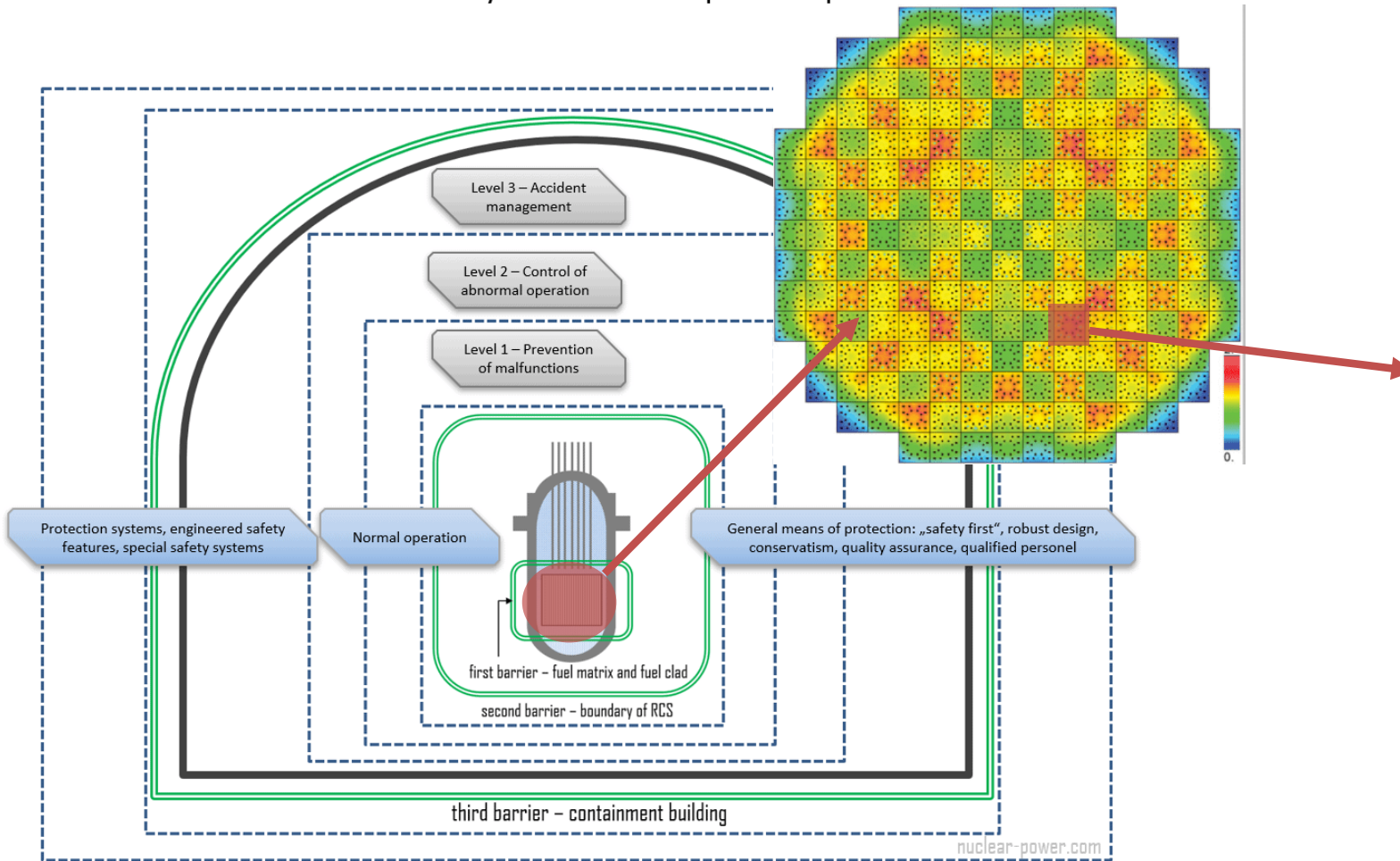
[bravo.ivangabriel@gmail.com](mailto:bravo.ivangabriel@gmail.com)

11 de junio de 2026



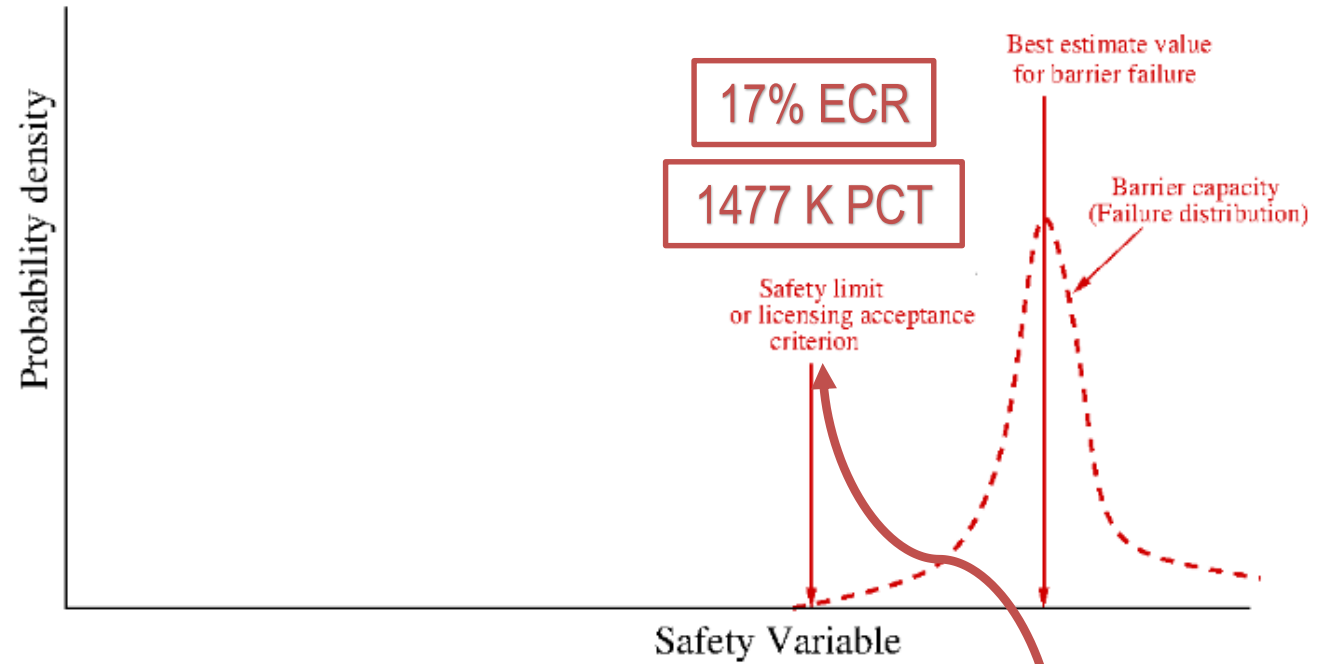
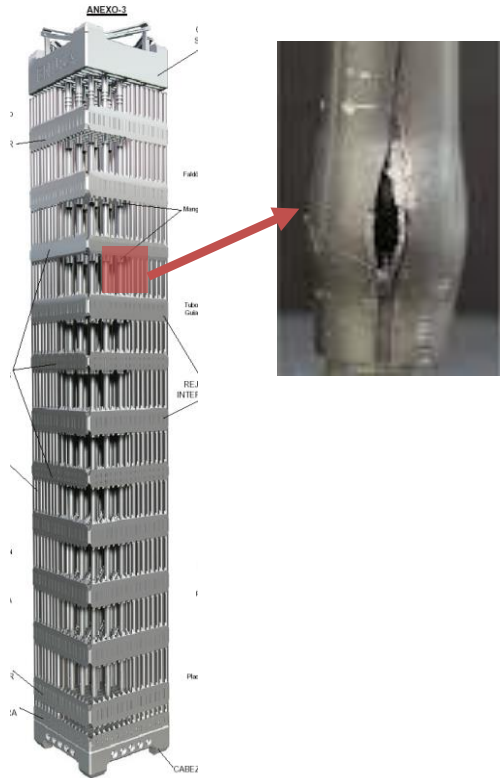
# Defensa en profundidad, barreras, la vaina

## Nuclear Safety – Defence-in-depth Principle



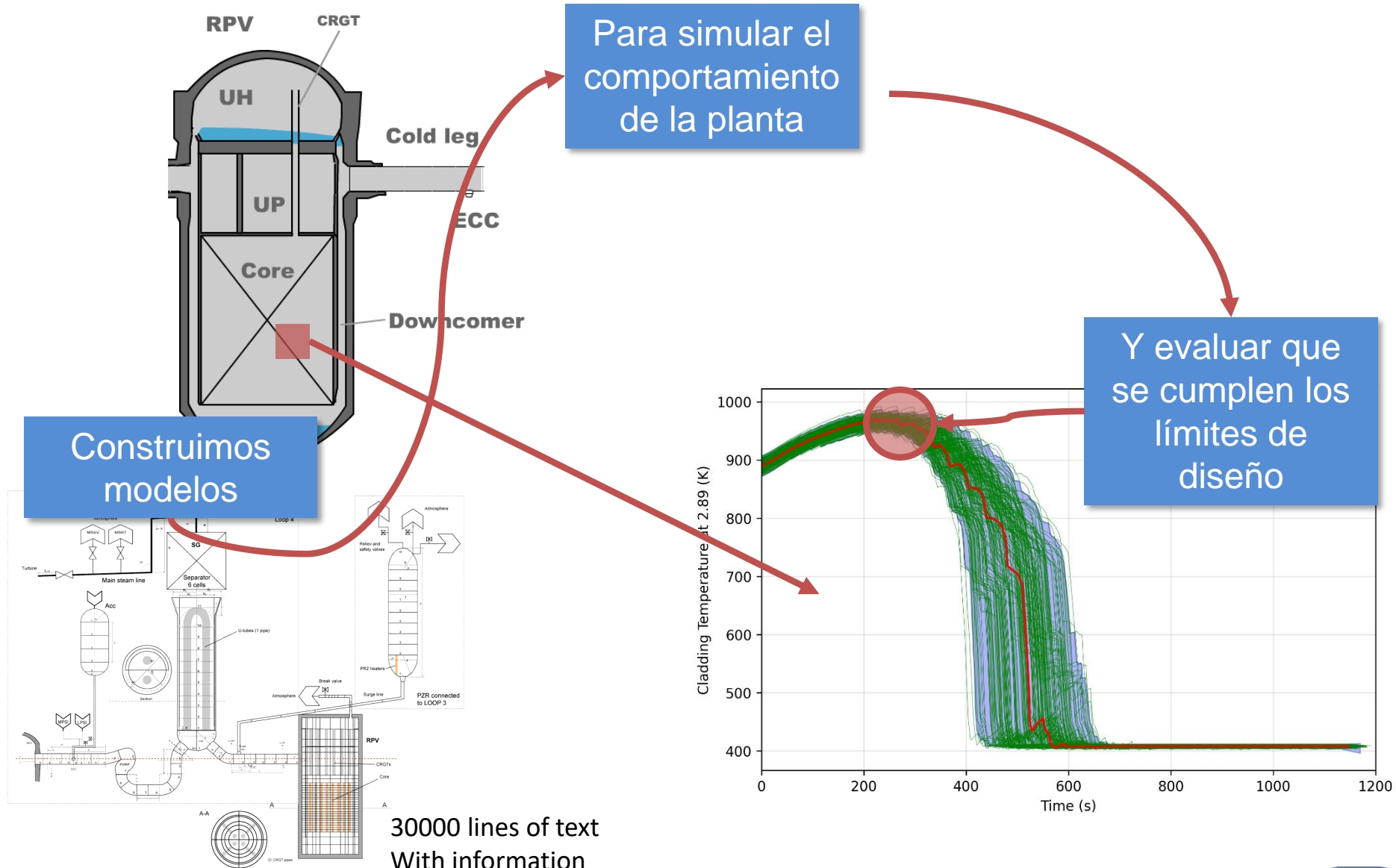
¿Cómo se compromete la función de seguridad de la vaina?

# Márgenes de seguridad

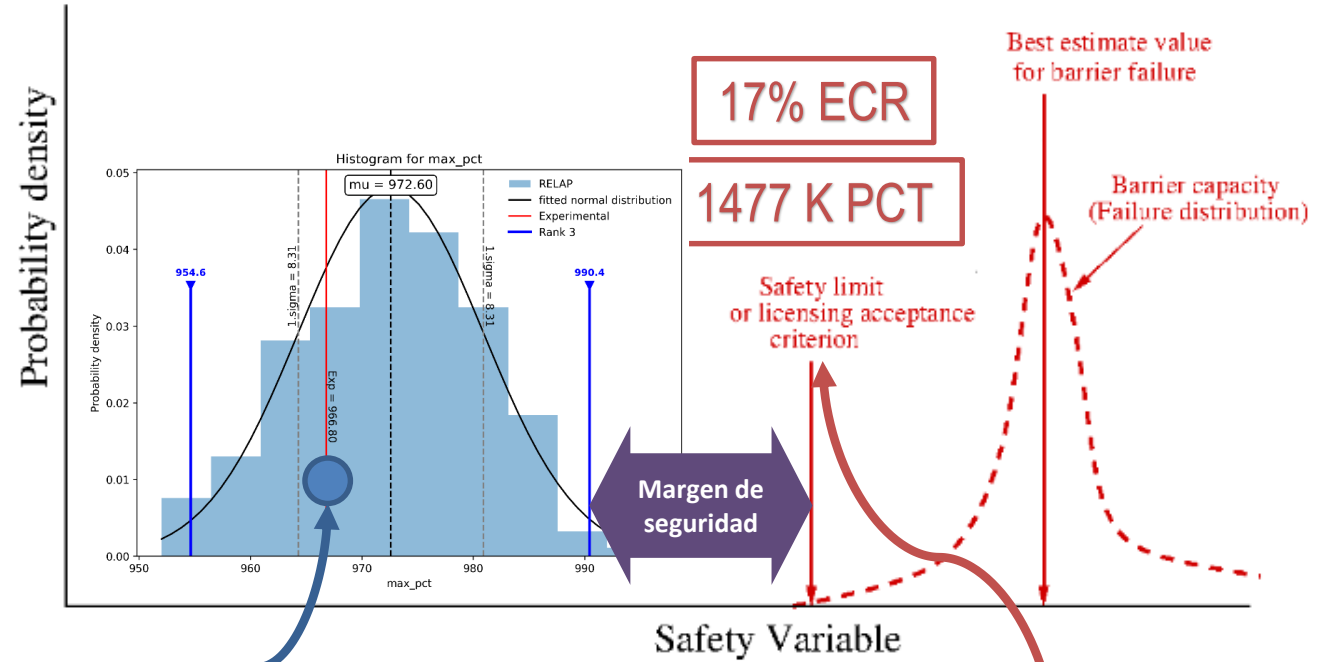
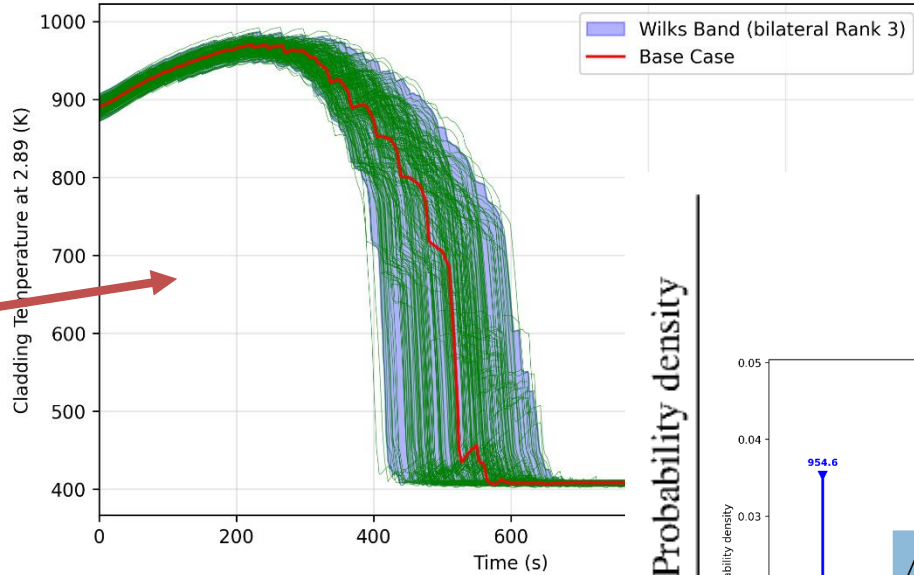
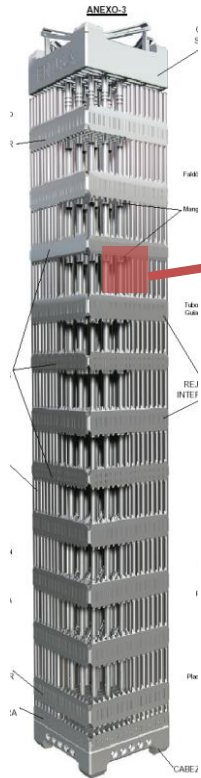


- Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
  - Oxidación

# Escenarios base de diseño: LOCA



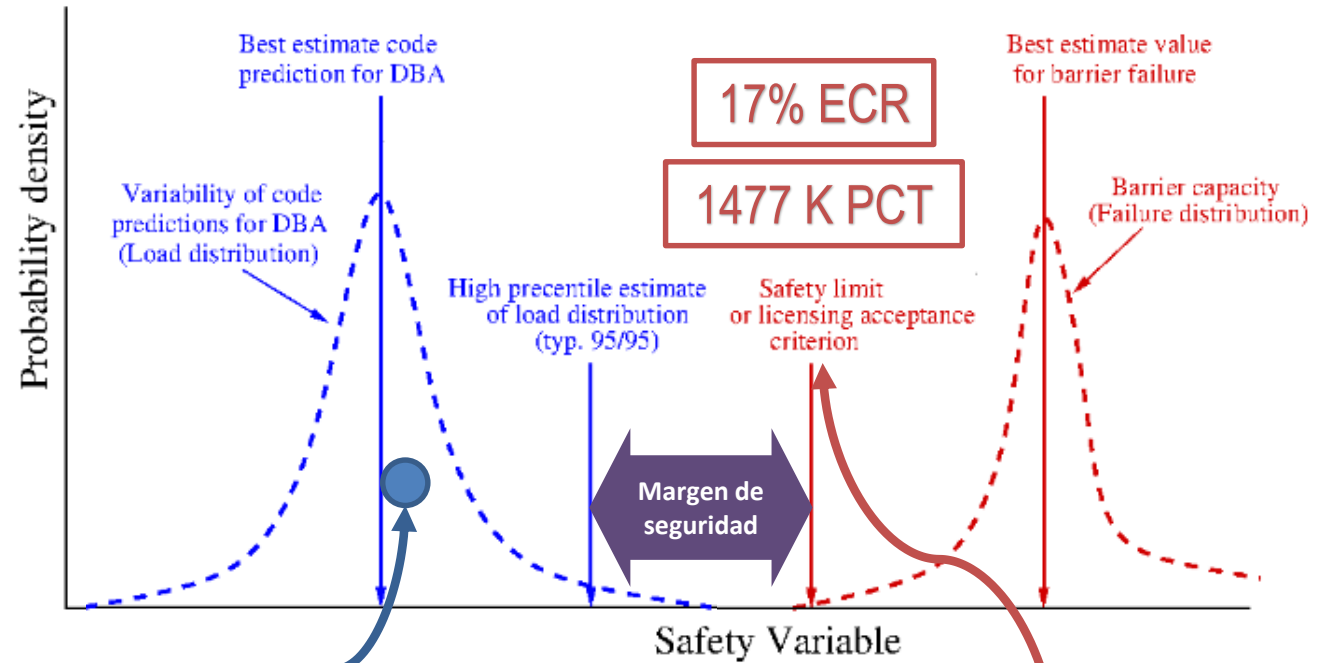
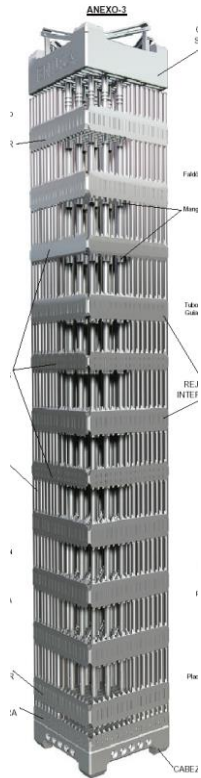
# Márgenes de seguridad



Respuesta real (desconocida) al accidente

- Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
  - Oxidación

# Márgenes de seguridad

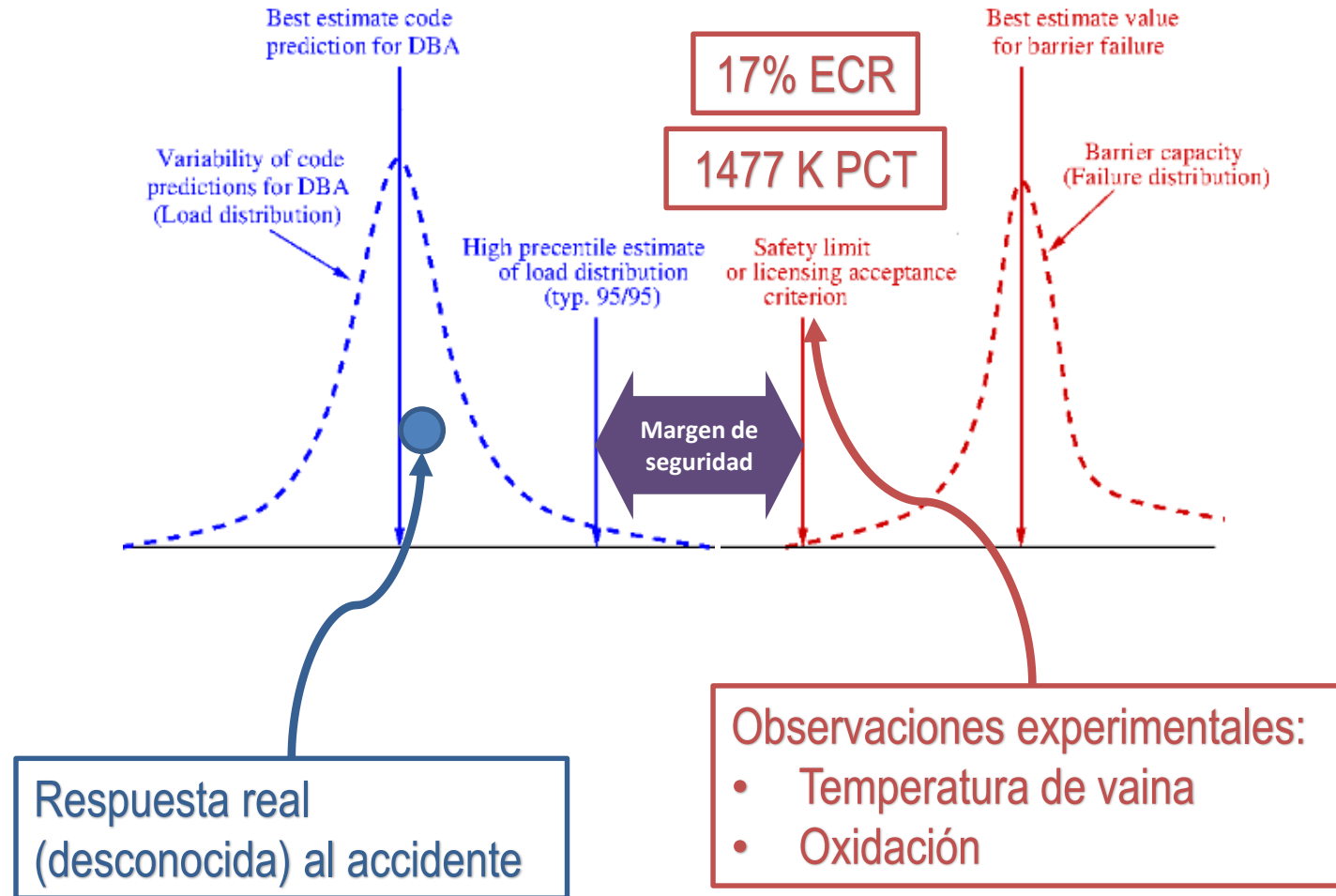


Respuesta real (desconocida) al accidente

- Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
  - Oxidación

# Mejorar los márgenes de seguridad

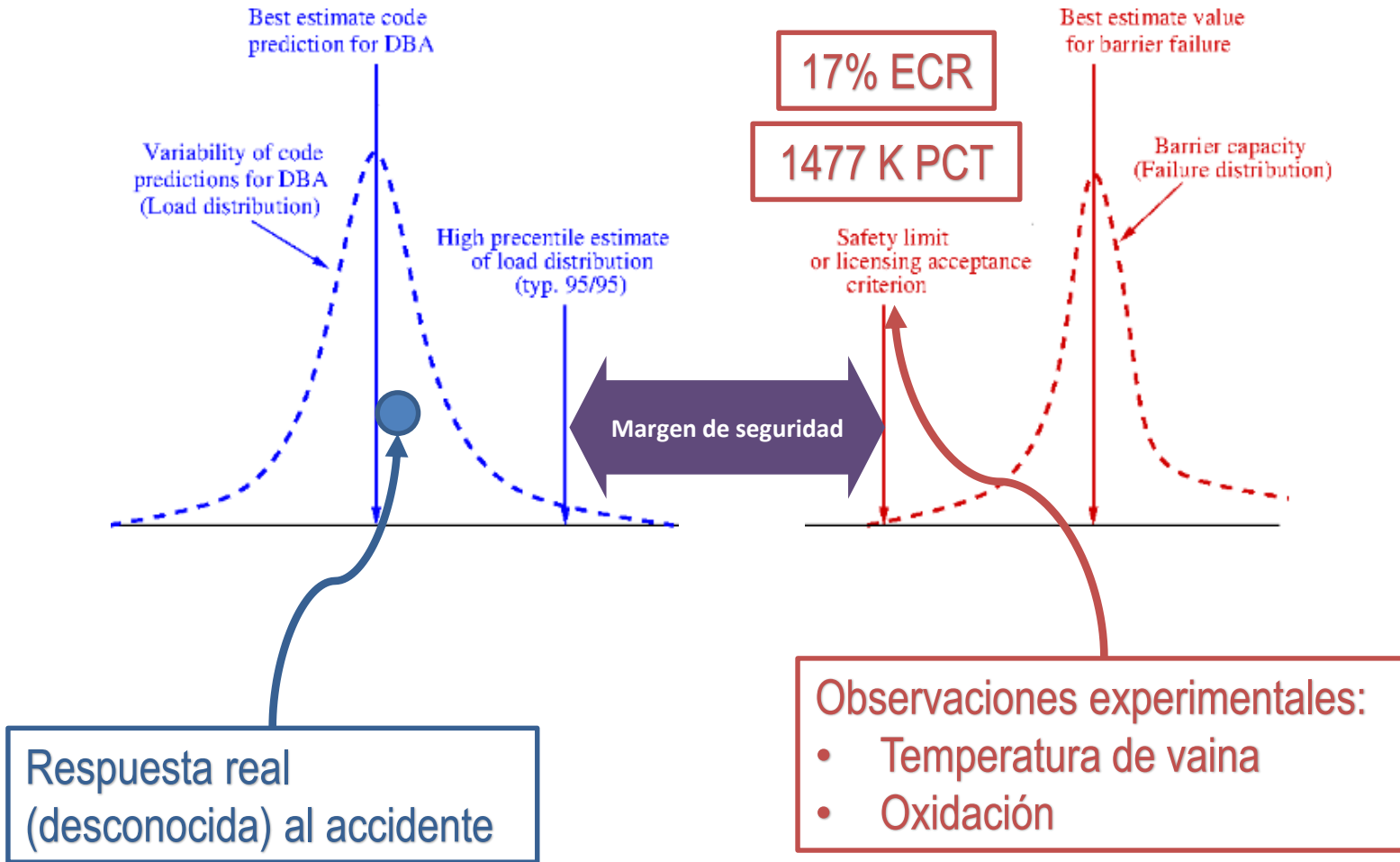
Mejorar la respuesta del sistema



# Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la Resistencia de la propia barrera

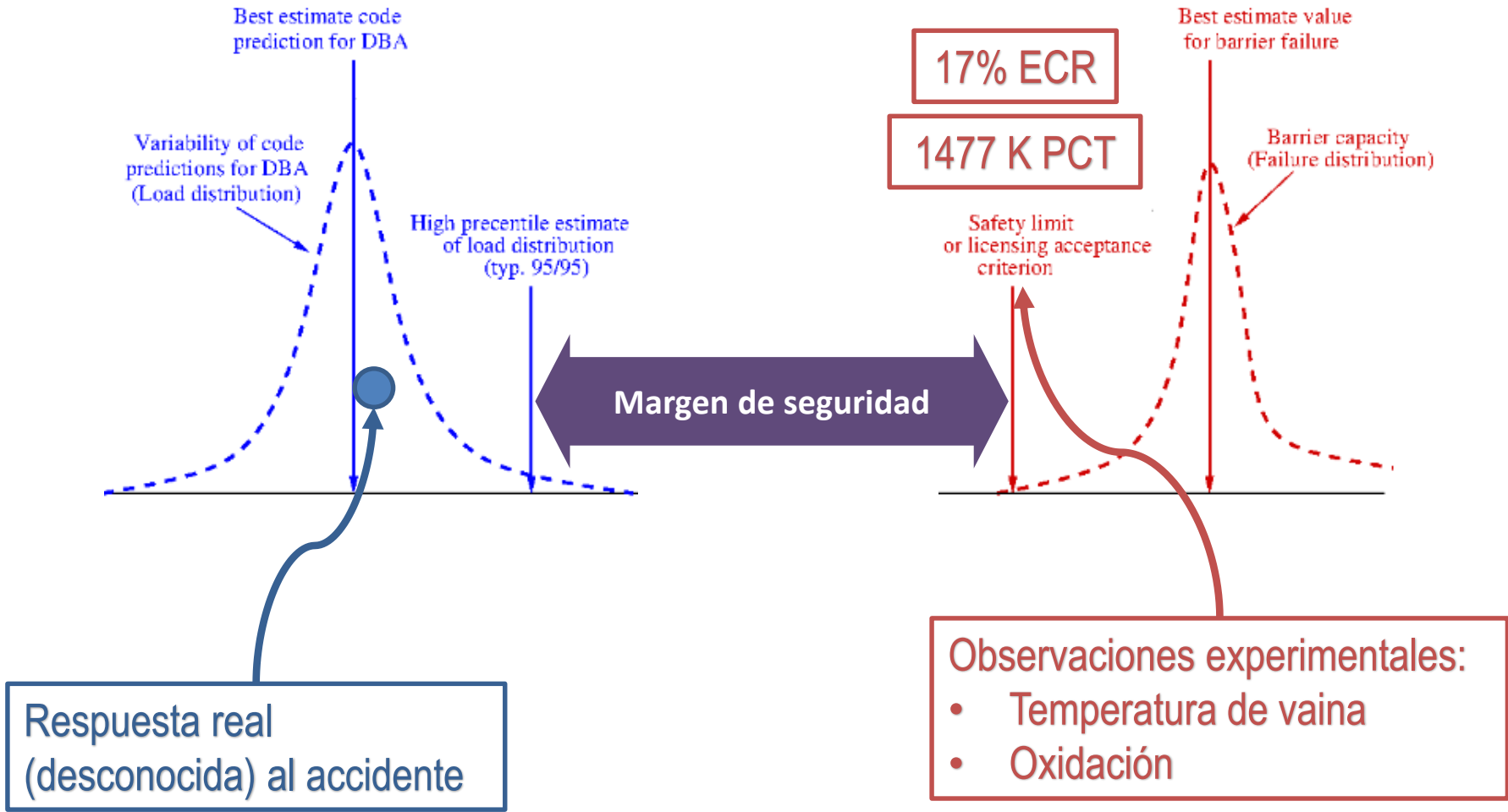
Mejorar la respuesta del sistema



# Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la respuesta del sistema

Mejorar la Resistencia de la propia barrera

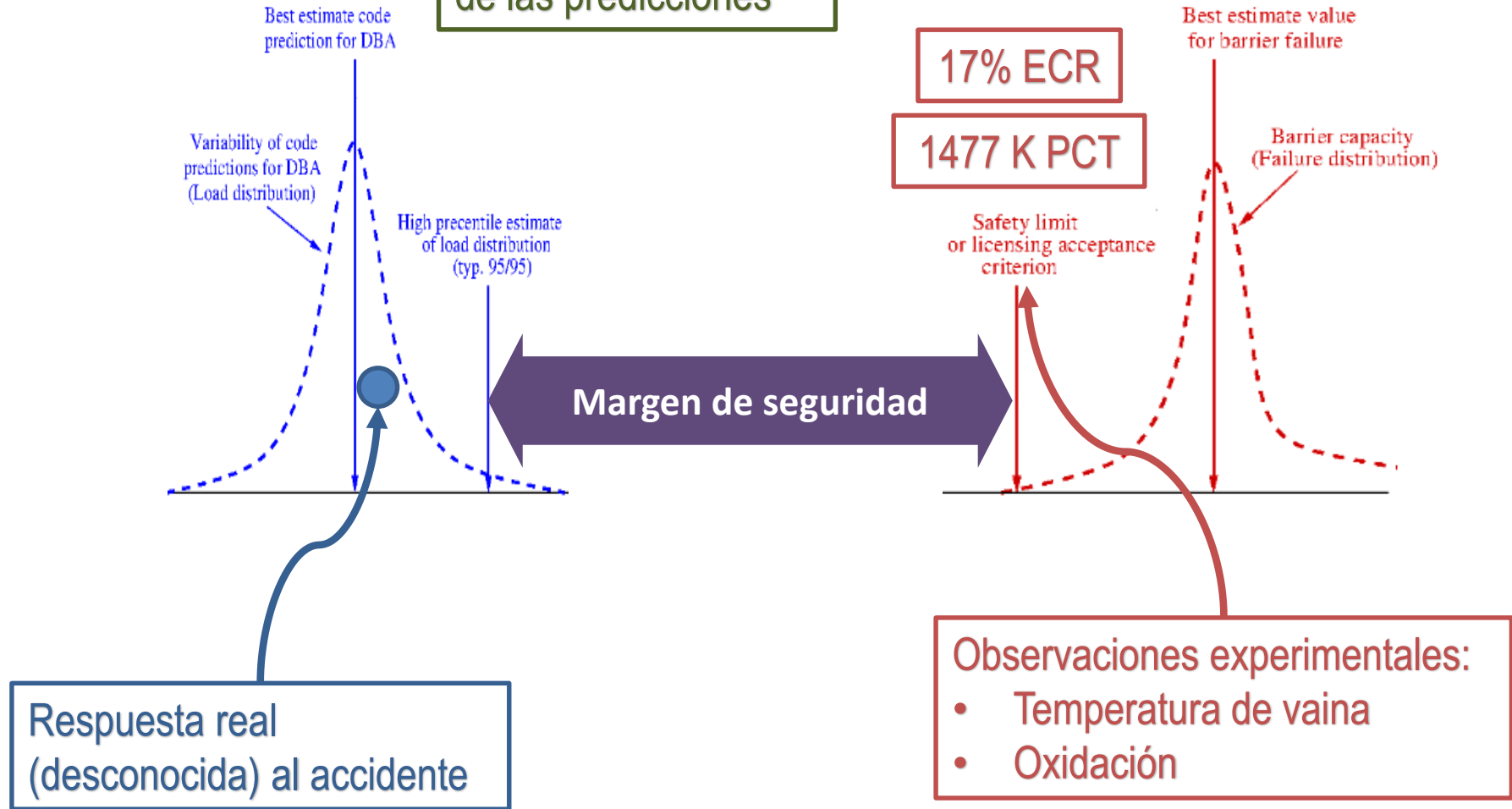


# Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la respuesta del sistema

Mejorar la precisión de las predicciones

Mejorar la Resistencia de la propia barrera

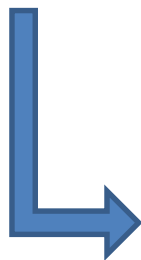


# ATF Advanced Technological Fuel

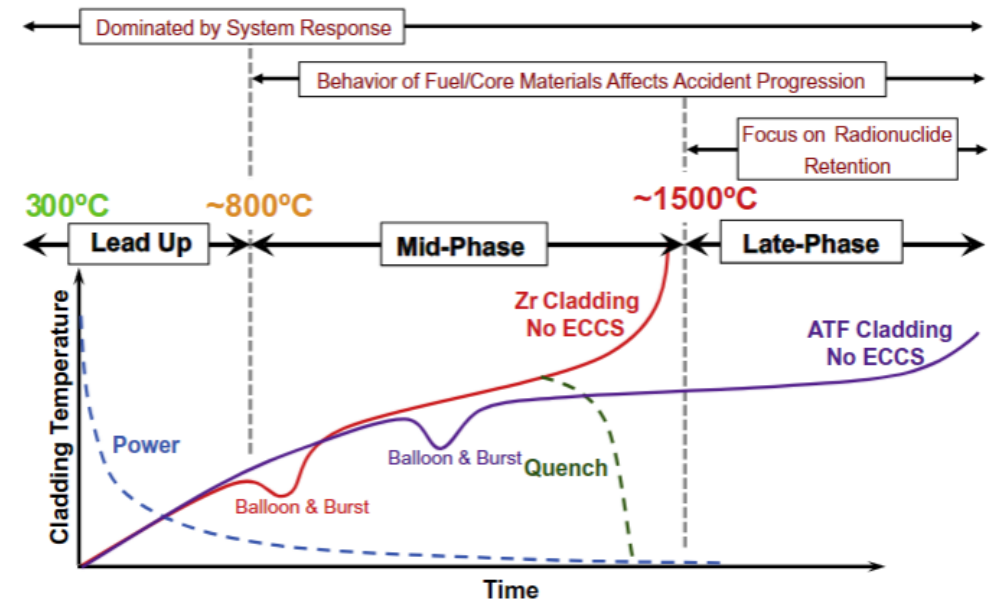
- Reducir la cantidad y la tasa de calor generado por la oxidación de la vaina en vapor:



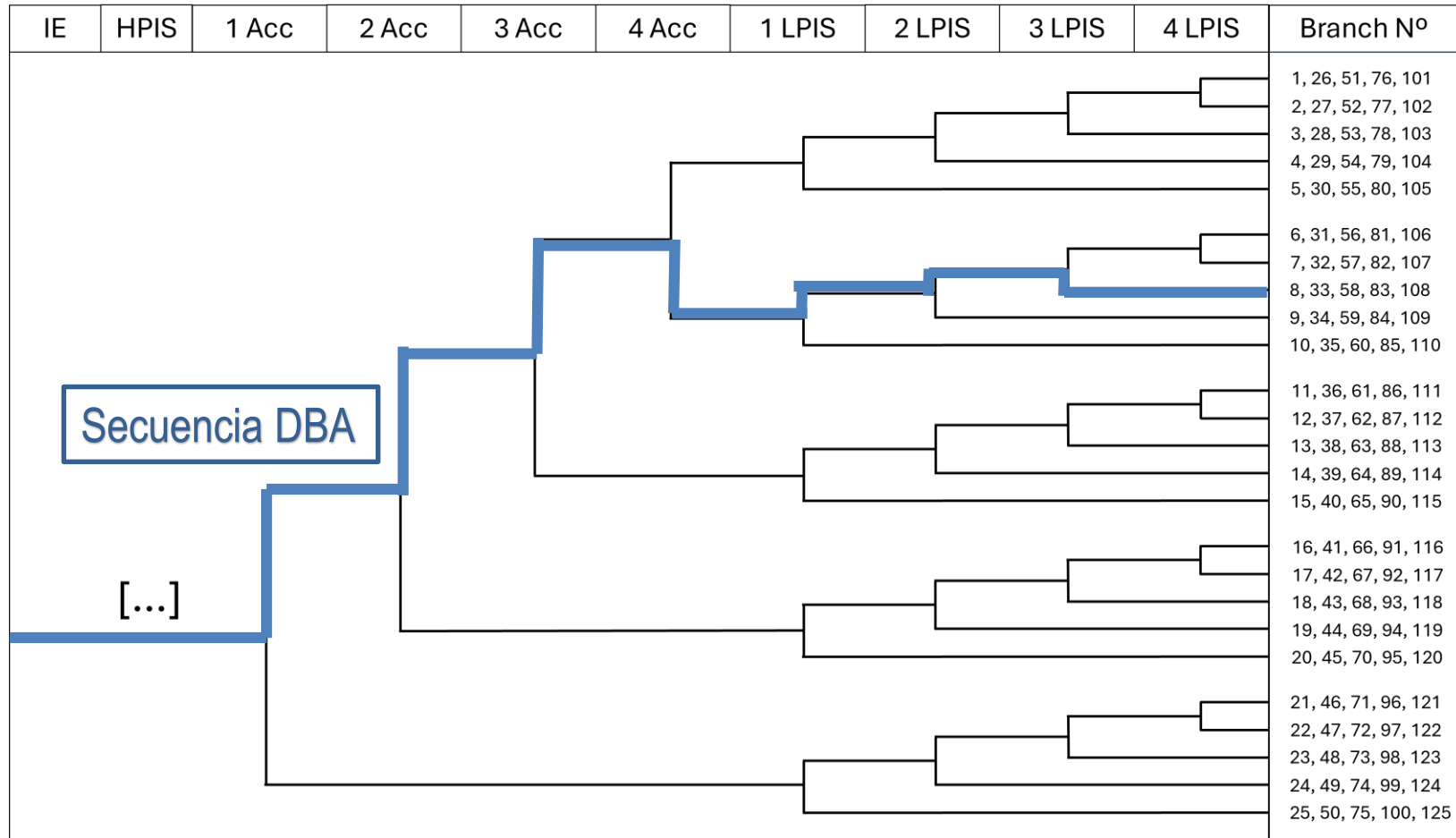
- Minimizar la generación de hidrógeno
- Retrasar estos procesos
- Mantener las propiedades del combustible estándar en operación normal



- Diseños de combustible alternativo al  $\text{UO}_2$
- **Diseños de vaina**
  - **ATF cromado**



# Exploración de casos (LBLOCA)



# ATF, posibles beneficios

- Taxonomía europea, pero... Con condiciones...
  - Hay que incorporar los elementos de combustible ATF
- Posibles beneficios:
  - Mejora de los márgenes de seguridad
  - Mejora en la frecuencia de daño al núcleo

**w n n**  
world nuclear news

## European Parliament backs nuclear and gas in EU taxonomy

06 July 2022

[Share](#)

The proposed inclusion of certain nuclear and gas activities within the European Union's list of officially approved "green" investments is set to become law after an attempt to block it fails in the European Parliament.



# Proyecto ATF

**Paso 1** Investigación bibliográfica de los modelos de oxidación

**Paso 2** Evaluación de las necesidades del código RELAP/SCDAP

**Paso 3** Implementación de un nuevo modelo de oxidación

**Paso 4** V&V del nuevo modelo

**Paso 5** Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

# Proyecto ATF

**Paso 1** Investigación bibliográfica de los modelos de oxidación

**Paso 2** Evaluación de las necesidades del código RELAP/SCDAP

**Paso 3** Implementación de un nuevo modelo de oxidación

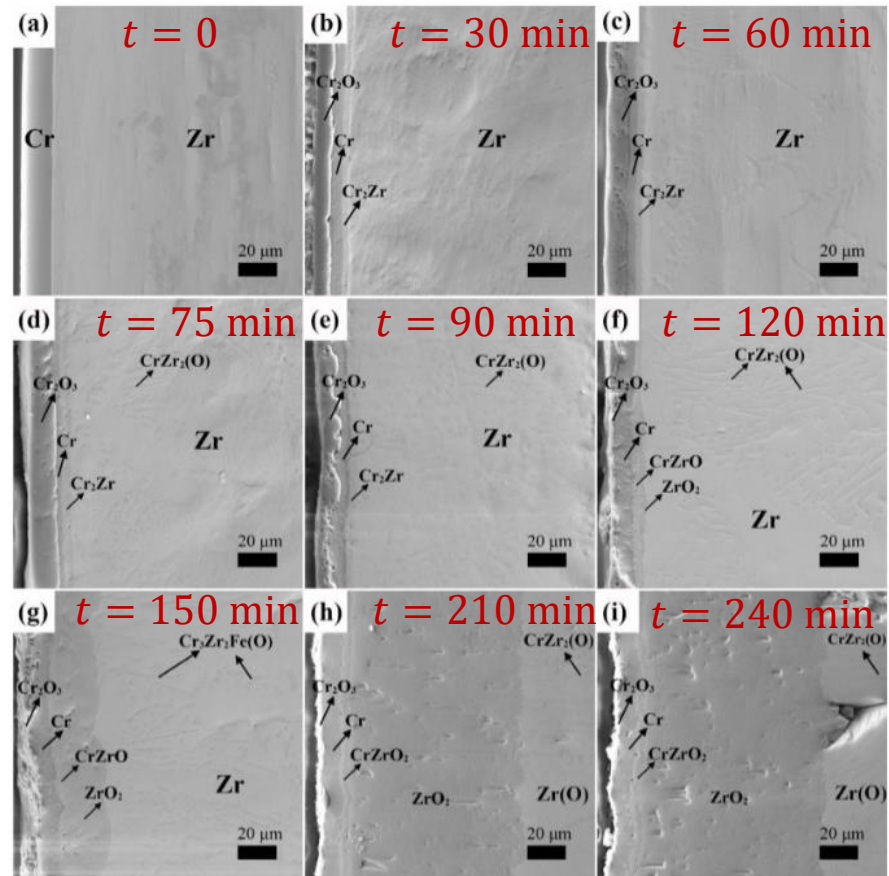
**Paso 4** V&V del nuevo modelo

**Paso 5** Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

# Oxidación del ATF cromado

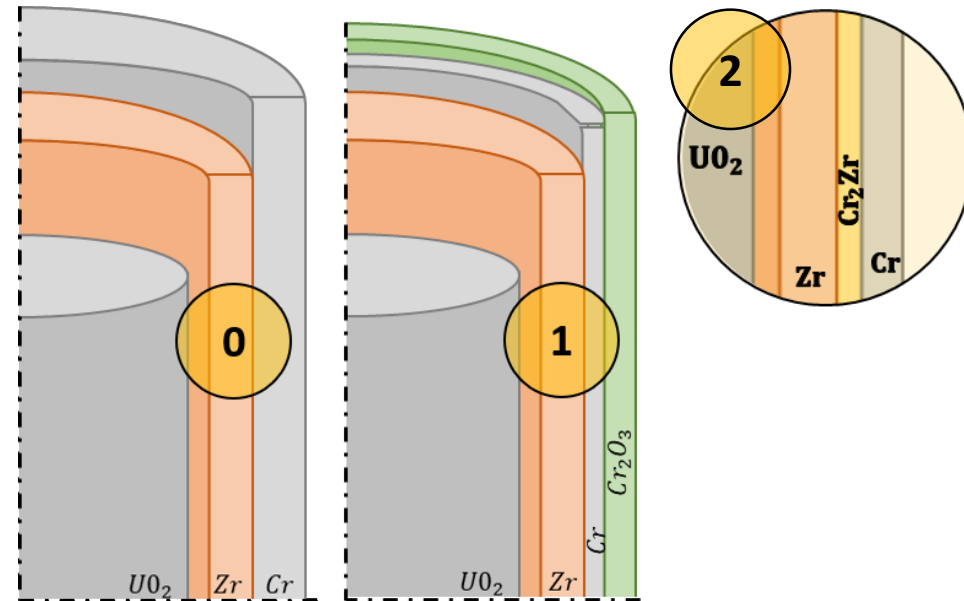
## OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

Han et al.



16 μm de Cr; ambiente de vapor a 1473 K

## RESUMEN

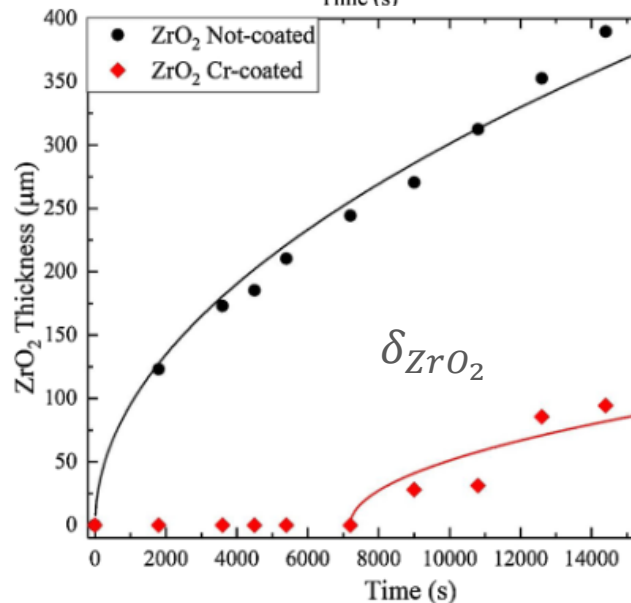
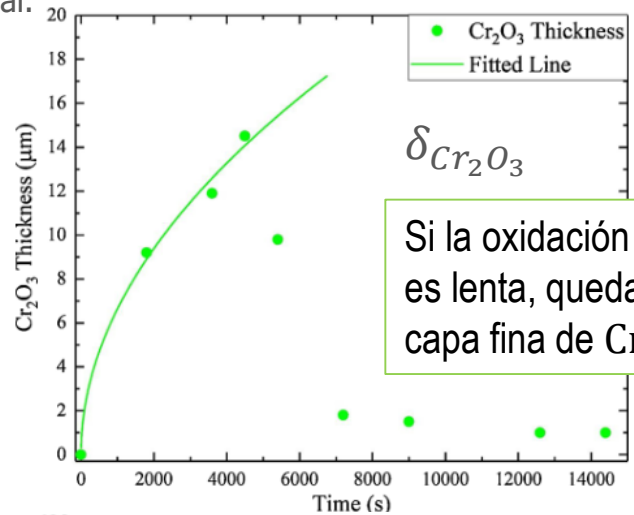


# Oxidación del ATF cromado

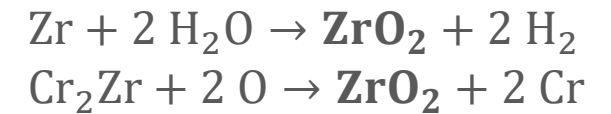
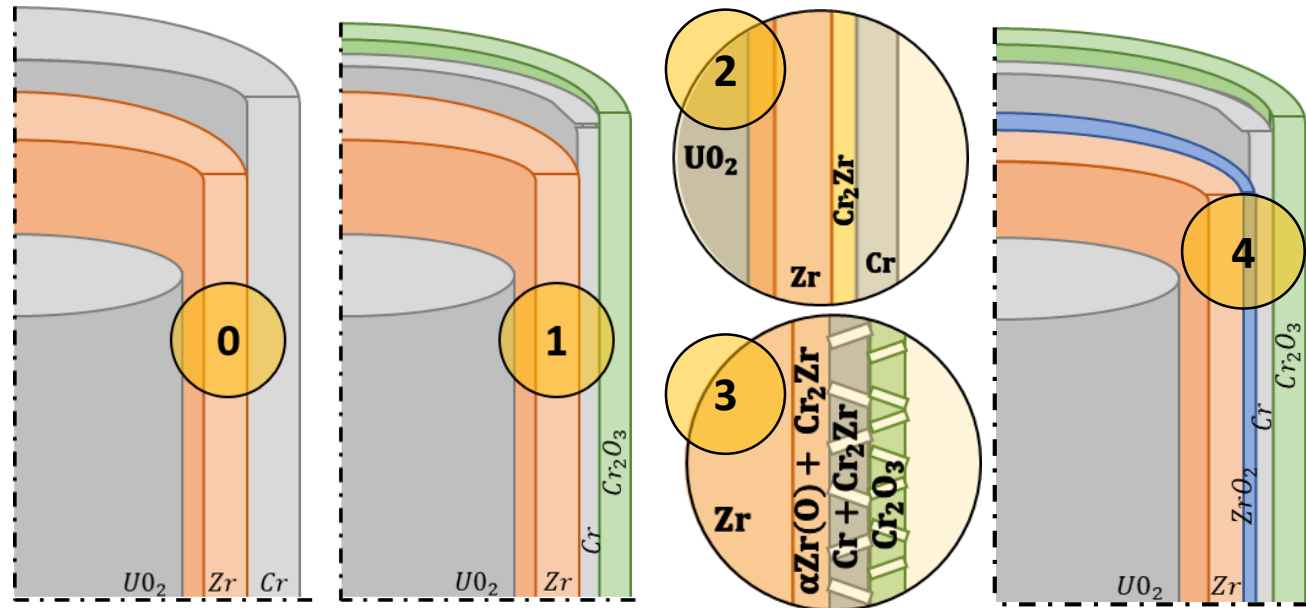
## OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

Han et al.

16 μm de Cr; ambiente de vapor a 1473 K



## RESUMEN



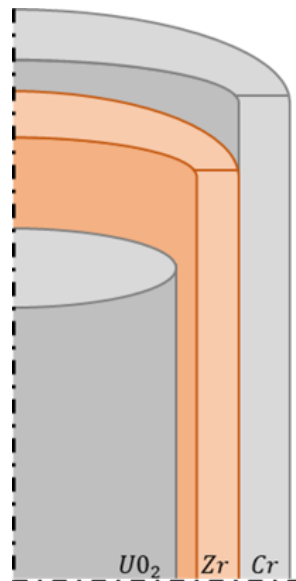
El ATF cromado no evita la formación de  $ZrO_2$ , pero protege al  $Zr_{14}$  de una oxidación **rápida**

# Modelo de oxidación del ATF cromado

- El modelo se basa en una simplificación de otros modelos previos y de datos experimentales:
  - ej. Tanto el Cr como el Zry4 se deforman según el modelo de deformación del Zry4 de SCDAP



NO se simula el proceso físico de oxidación del revestimiento de Cr



En cambio, se usan correlaciones para modelar los **efectos** que tiene la oxidación de la capa de Cr en:

Oxidación de Zry4

Producción de  $H_2$

Producción  $Q_{oxidación}$

# Modelo de oxidación del ATF cromado

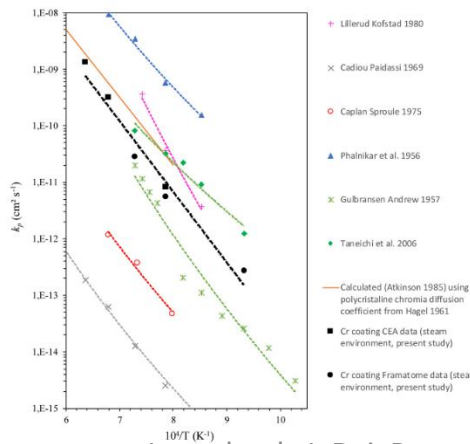
- Se establecen distintos regímenes de oxidación del Zry4 según la evolución de:

- $T_{Cr} \equiv$  Temperatura superficial de la vaina cromada [K]
- $t(T_{Cr} \geq 1000 \text{ K}) \equiv$  Tiempo desde el inicio de la oxidación del Cr [s]
- $\delta_{Cr_2O_3}(t, T_{Cr}) \equiv$  Espesor de la capa de cromia [m]

Se evalúan en cada nodo axial



$$\delta_{Cr_2O_3}(t, T_{Cr}) = \begin{cases} \delta_0 & \text{if } T_{Cr} < 1000 \text{ K} \\ \left(2\bar{A}e^{-\frac{\bar{B}}{T_{Cr}}} \cdot t + \delta_0^2\right)^{1/2} & \text{if } 1000 \text{ K} \leq T_{Cr} < 1586 \text{ K} \end{cases} \quad \bar{r}^2 = 0.9996$$



$t$  tiempo tras  $T_{Cr} \geq 1000 \text{ K}$  [s]

$\delta_0$  espesor inicial de cromia

[m]

$\bar{A} = 2.6687 \cdot 10^{-3}$  constante de ajuste  
[m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>]

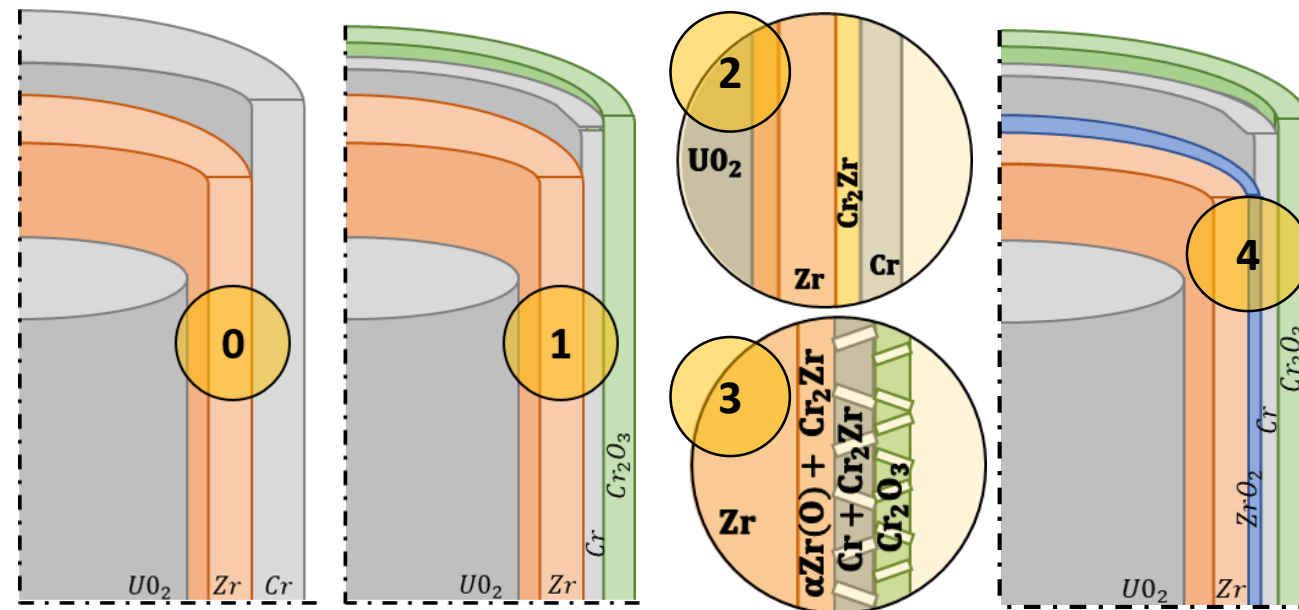
$\bar{B} = 38989$  constante de ajuste [K]

CEA y Framatome; revestimientos de 305 y 400  $\mu\text{m}$  vapor entre 1000 y 1573 K

ajuste [K]

# Modelo de oxidación del ATF cromado

- Se imponen dos límites superiores para el fallo del revestimiento de Cr:
  - $\delta_{\text{Cr}_2\text{O}_3} \geq \varepsilon_1$   $\rightarrow$  el espesor de Cr inicial  $\varepsilon_1$  se oxida por completo
  - $T_{\text{Cr}} \geq 1586 \text{ K}$   $\rightarrow$  se llega al punto de formación del eutéctico Zr-Cr



# Proyecto ATF

**Paso 1**

Investigación bibliográfica de los modelos de oxidación

**Paso 2**

Evaluación de las necesidades del código RELAP/SCDAP

**Paso 3**

Implementación de un nuevo modelo de oxidación

**Paso 4**

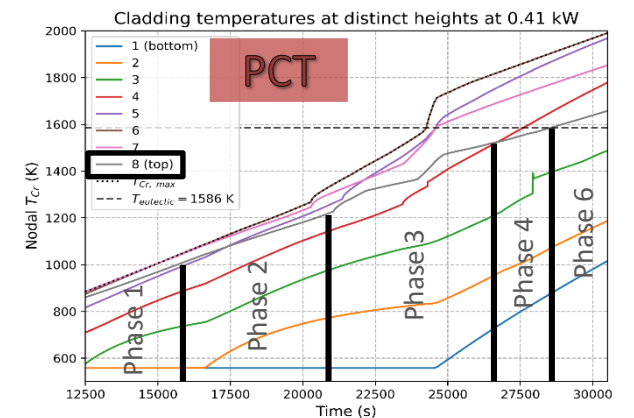
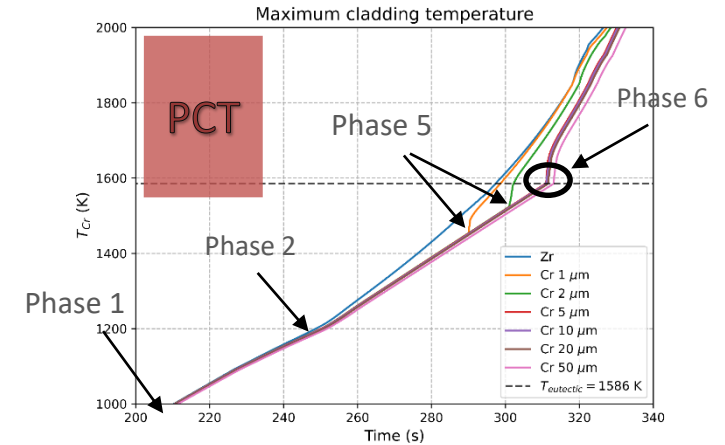
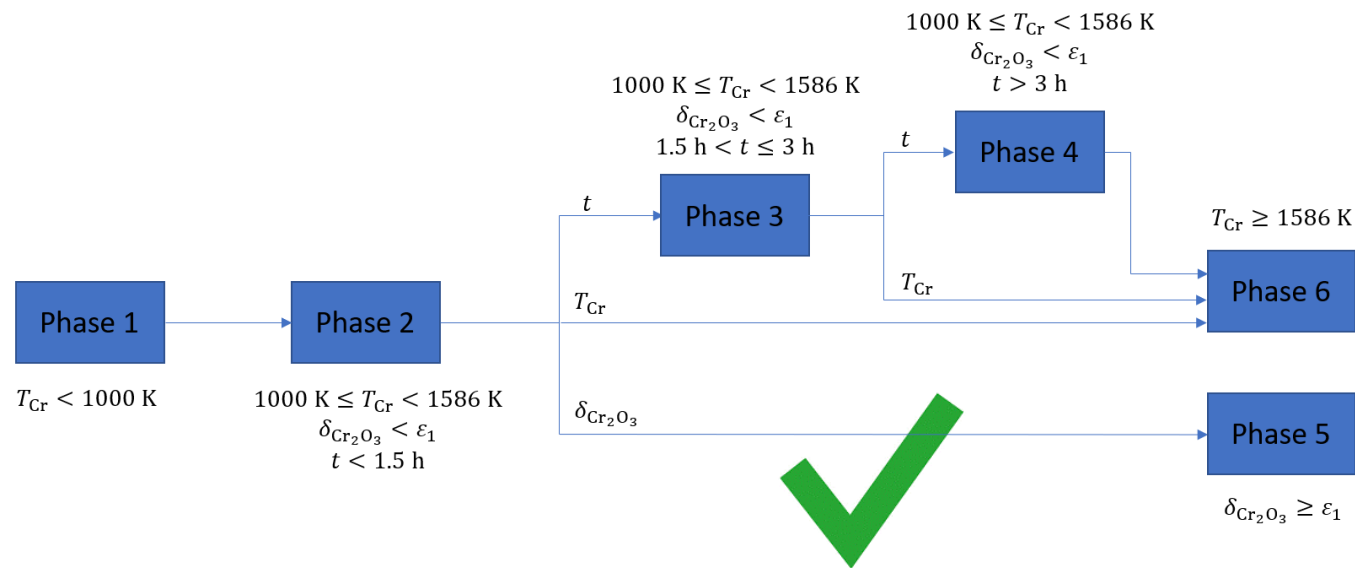
V&V del nuevo modelo

**Paso 5**

Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

# Verificación del modelo de oxidación

- Se ha verificado el modelo de oxidación con un input simplificado de un boil-off



# Proyecto ATF

**Paso 1**

Investigación bibliográfica de los modelos de oxidación

**Paso 2**

Evaluación de las necesidades del código RELAP/SCDAP

**Paso 3**

Implementación de un nuevo modelo de oxidación

**Paso 4**

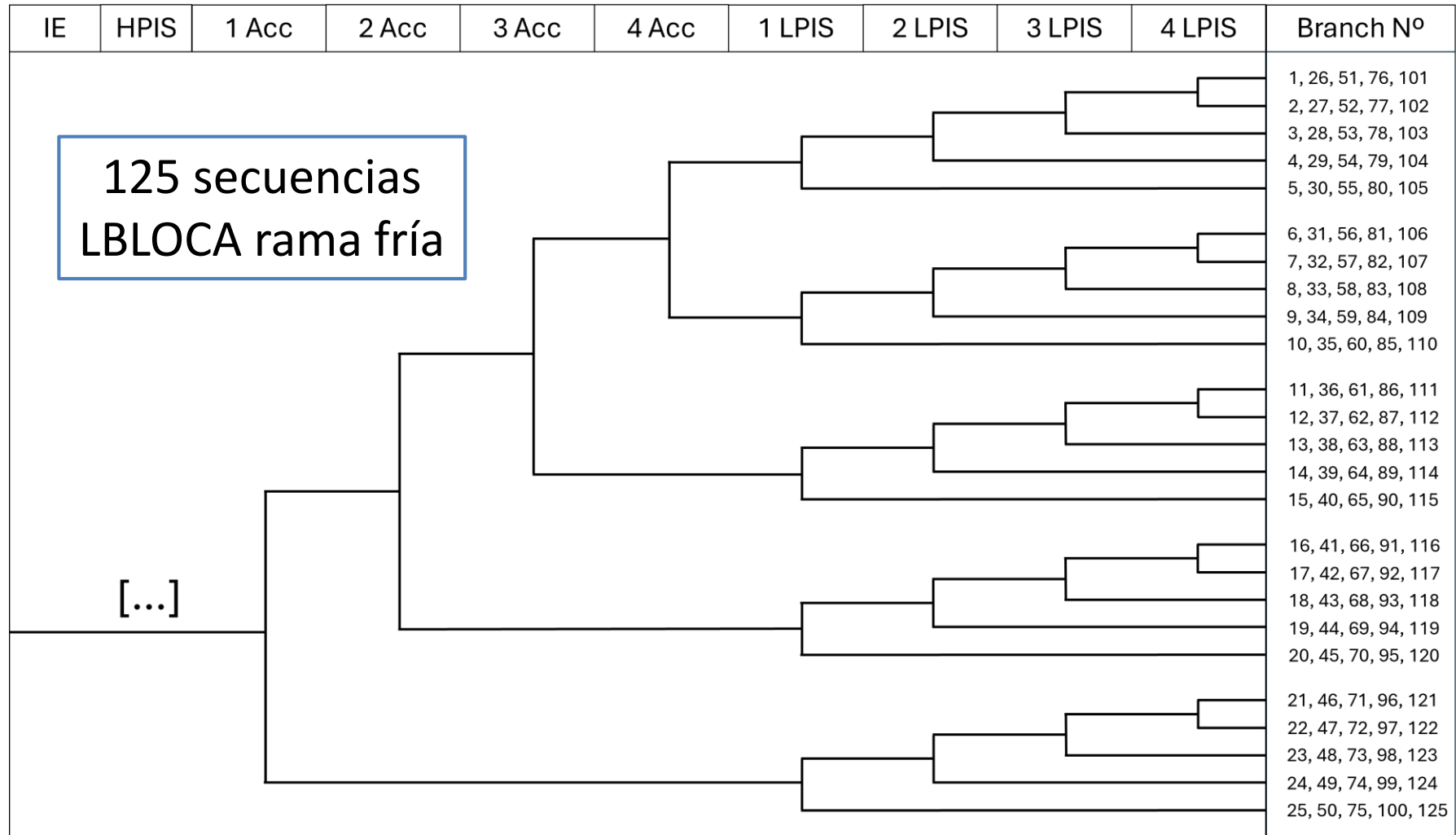
V&V del nuevo modelo

**Paso 5**

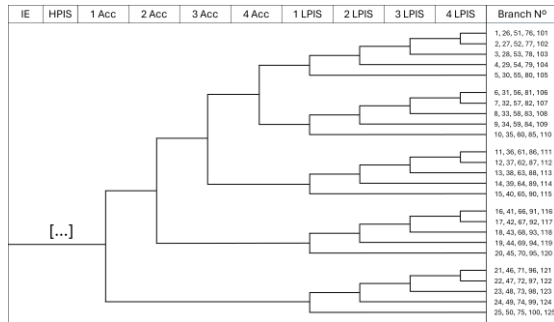
Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad



# Árbol de exploración de casos

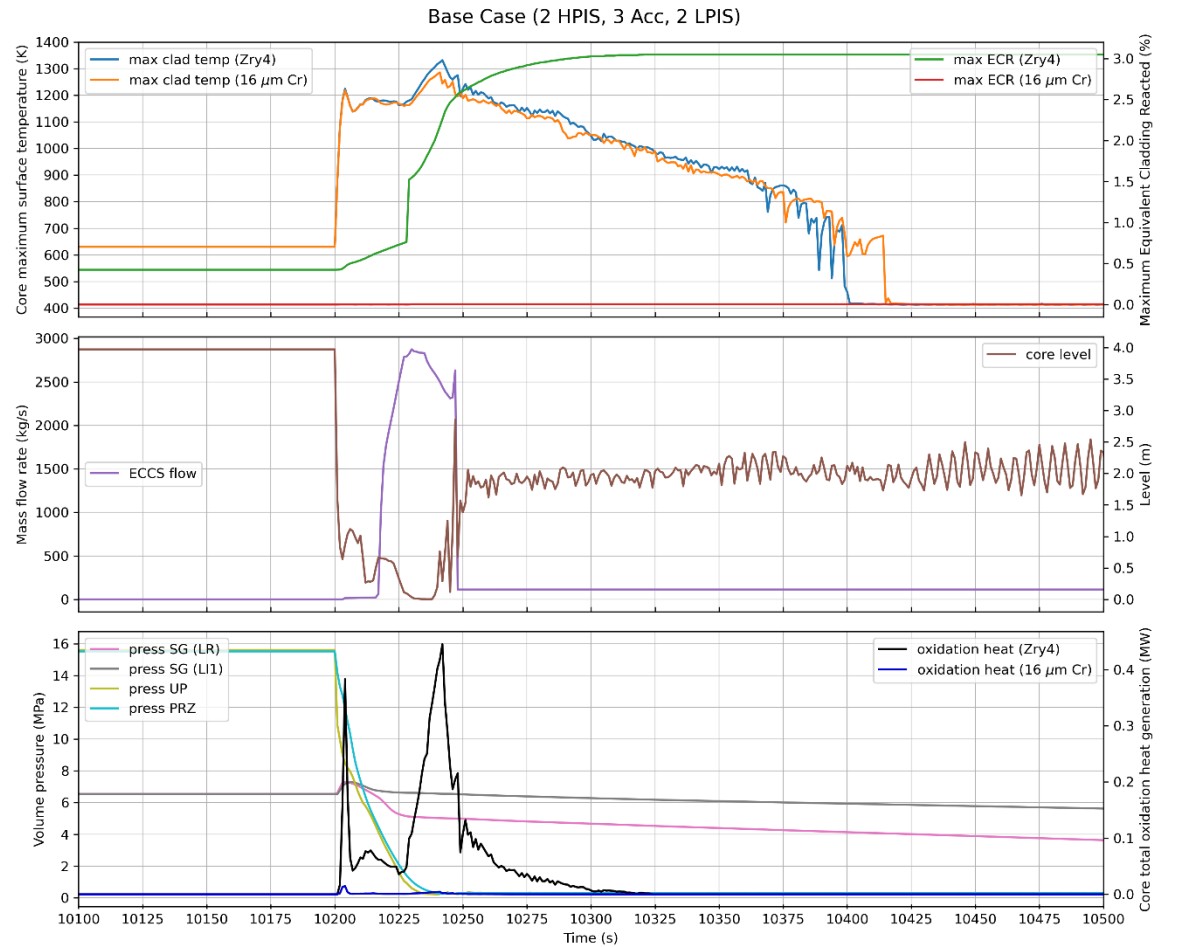


# Árbol de exploración de casos

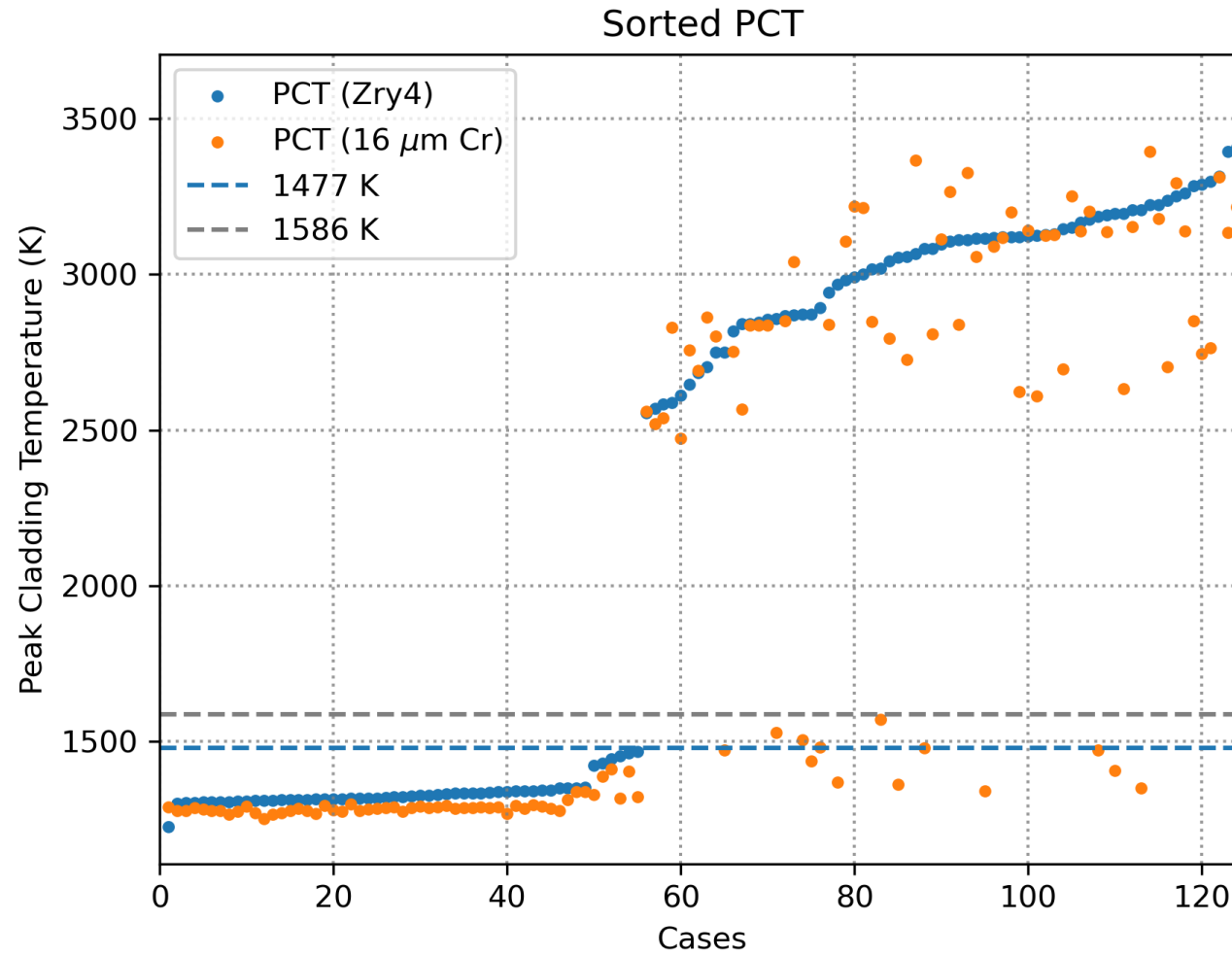


- Combustible estándar (Zry4)
- ATF cromado (16  $\mu\text{m}$  Cr)

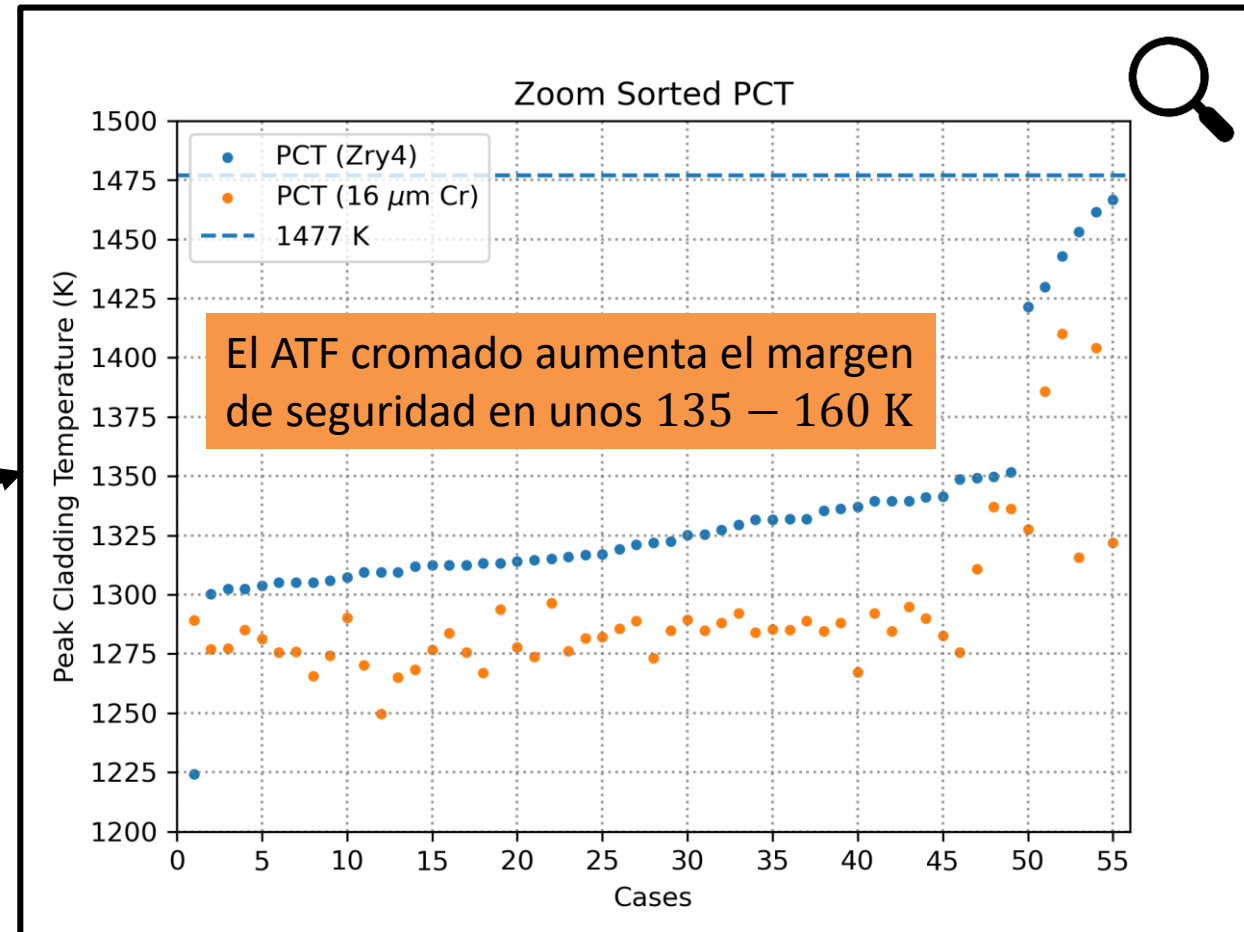
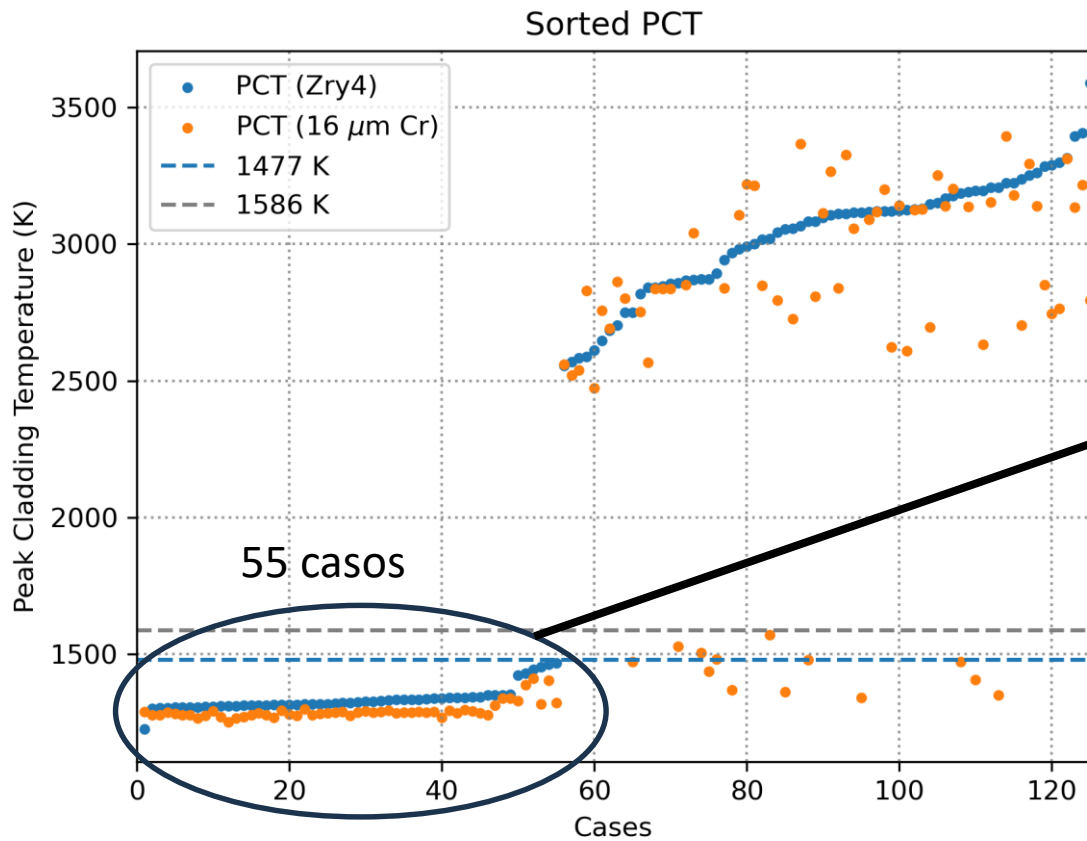
- PCT
- ECR máximo



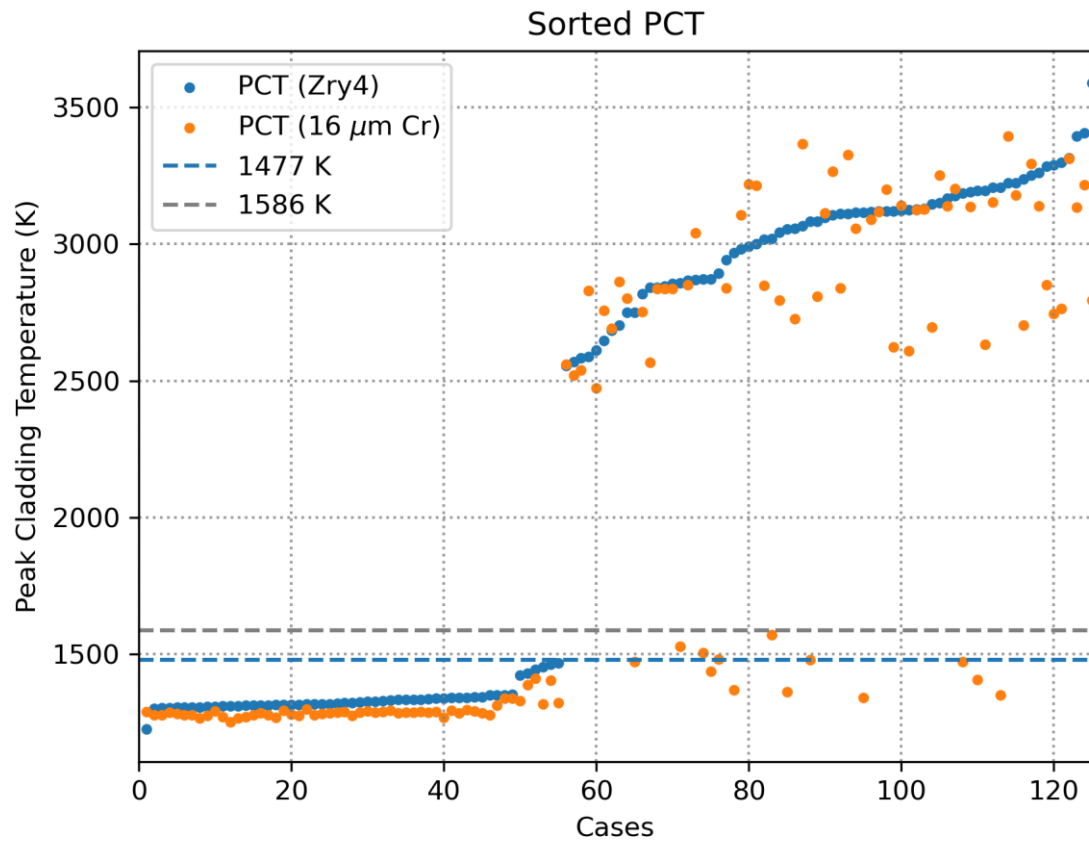
# Resultados PCT



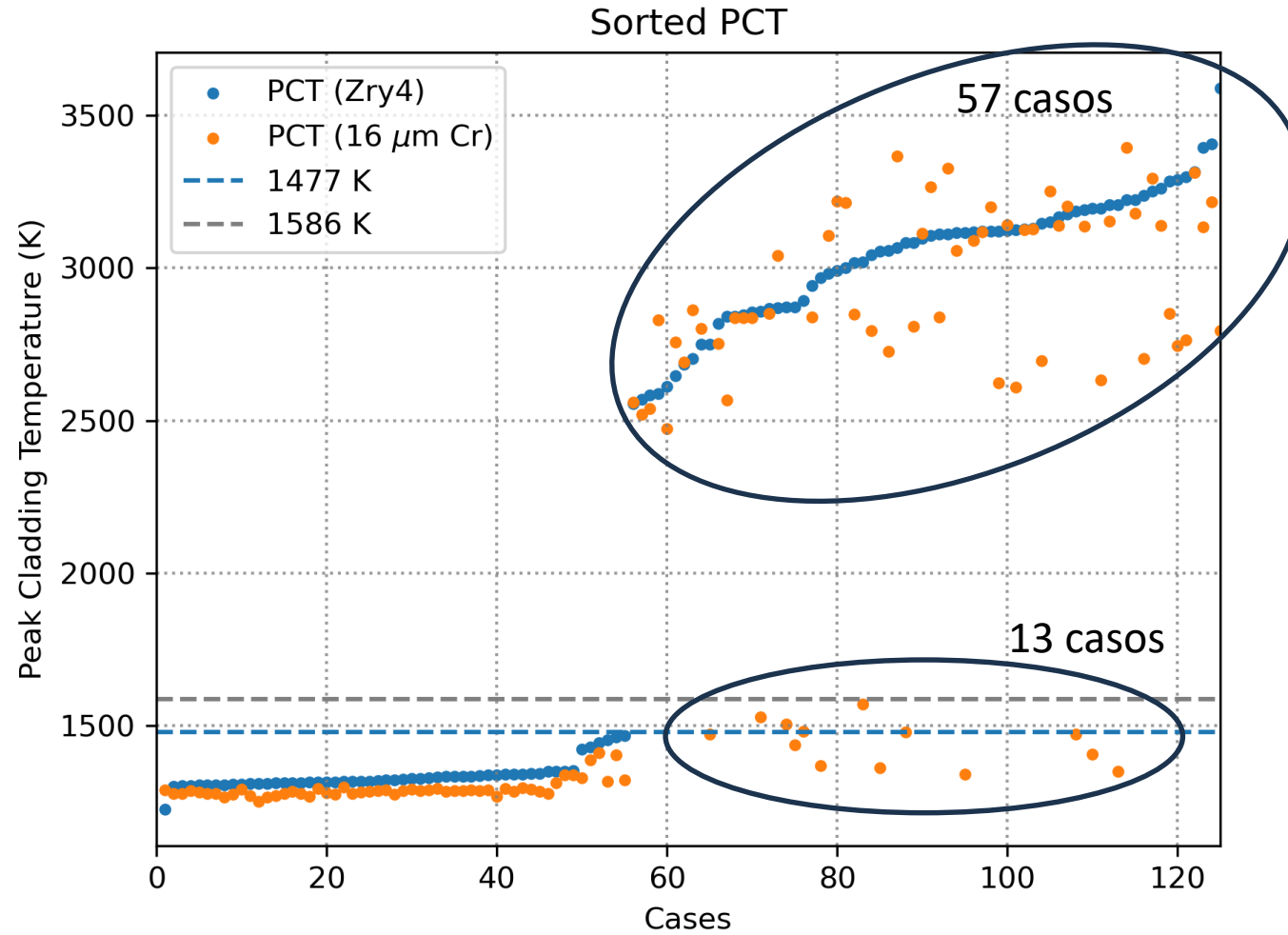
# Resultados PCT



# Resultados PCT

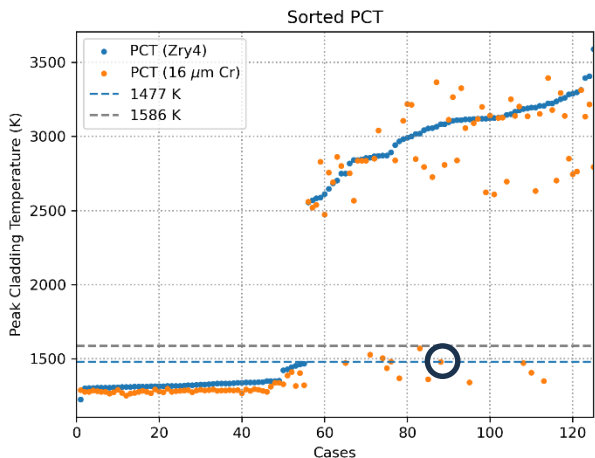
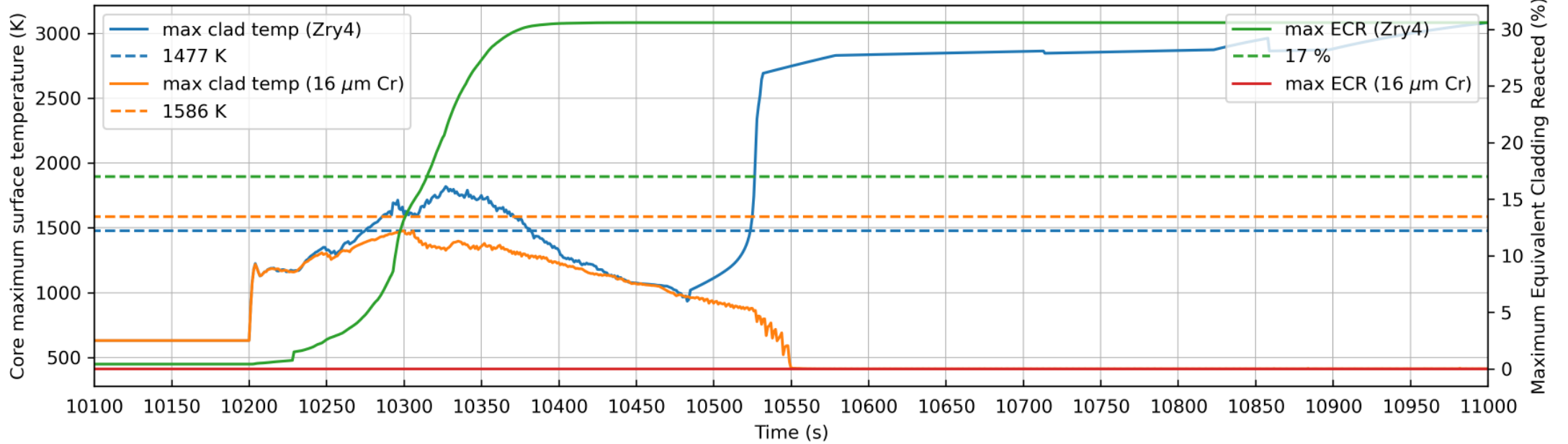


# Resultados PCT

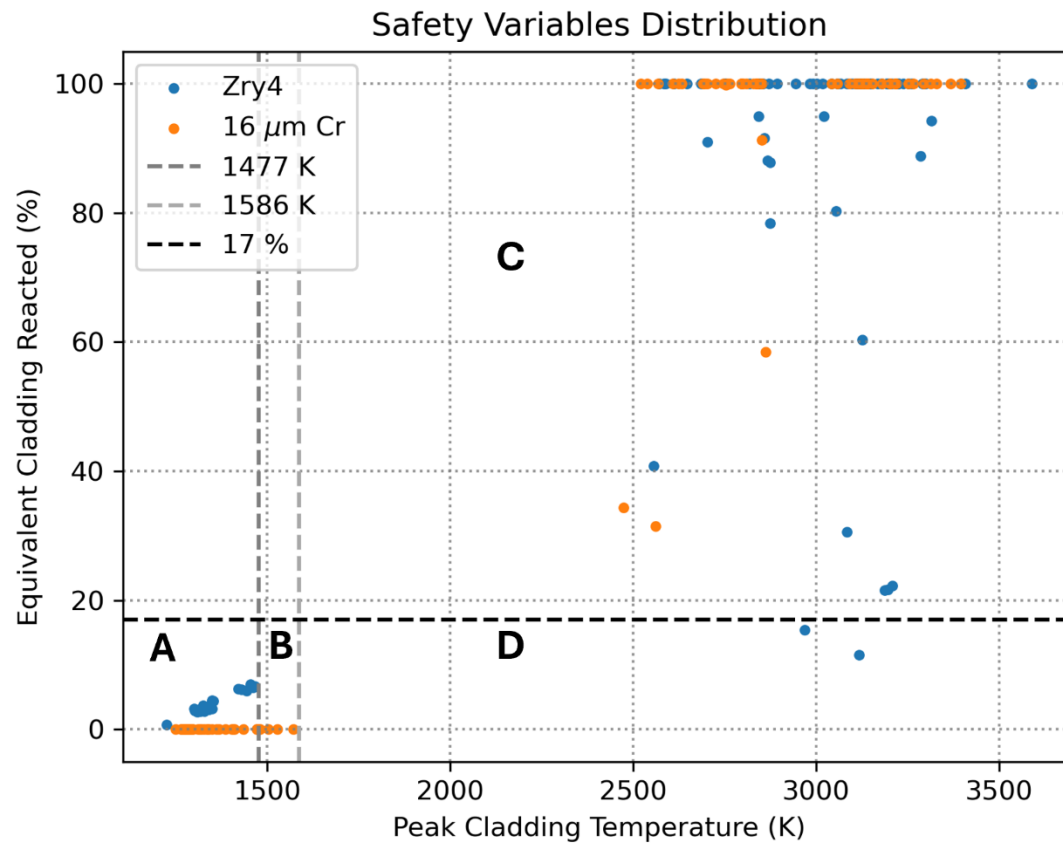


# Caso en que el ATF evita la degradación del núcleo

0 HPIS, 2 Acc, 2 LPIS



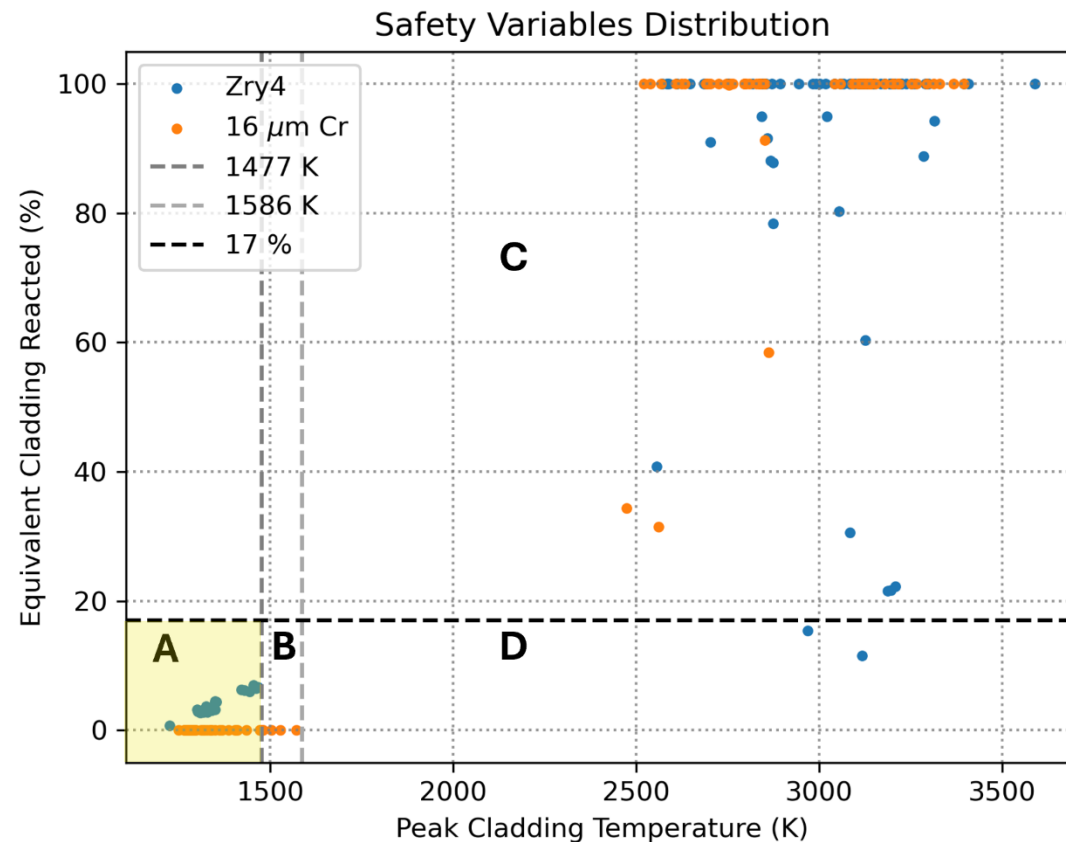
# Resultados LBLOCA



	Zry4	ATF (16μm Cr)	Proveniente de
<b>Región A</b> PCT < 1477 K ECR < 17 %	55	63	Región A (55) Región C (6) Región D (2)
<b>Región B</b> 1477 K ≤ PCT < 1586 K ECR < 17 %	0	5	Región C (5)
<b>Región C</b> PCT ≥ 1586 K ECR ≥ 17 %	68	57	Región C (57)
<b>Región D</b> PCT ≥ 1586 K ECR < 17 %	2	0	-
Casos sin daño en el núcleo	55	63 (68*)	-
Casos con daño en el núcleo	70	62 (57*)	-

# Resultados LBLOCA. Zry4

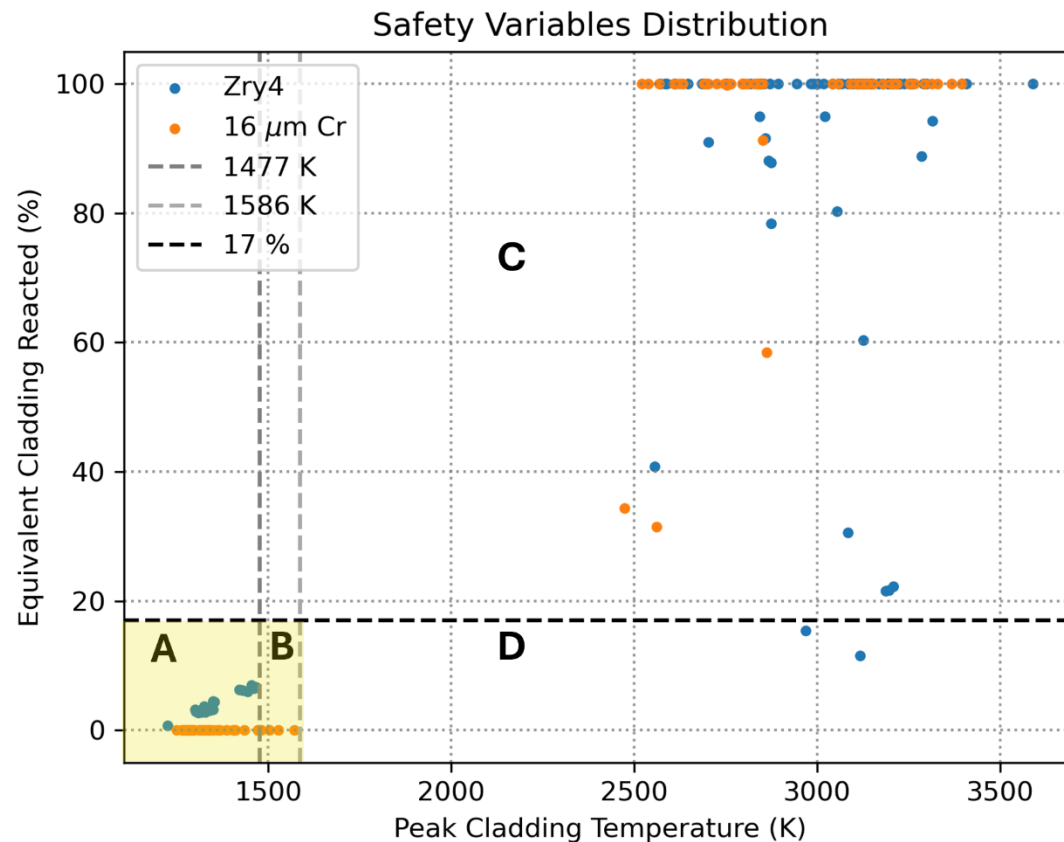
- No hay casos con ECR cercano al límite del 17%
  - A mayor temperatura de vaina, mayor oxidación de Zry4
  - La pérdida de ductilidad de las barras se suele dar por altas temperaturas, y no porque haya una gran proporción de vaina que se oxide



	Zry4	ATF (16 $\mu\text{m}$ Cr)	Proveniente de
<b>Región A</b> $PCT < 1477\text{ K}$ $ECR < 17\%$	55	63	Región A (55) Región C (6) Región D (2)
<b>Región B</b> $1477\text{ K} \leq PCT < 1586\text{ K}$ $ECR < 17\%$	0	5	Región C (5)
<b>Región C</b> $PCT \geq 1586\text{ K}$ $ECR \geq 17\%$	68	57	Región C (57)
<b>Región D</b> $PCT \geq 1586\text{ K}$ $ECR < 17\%$	2	0	-
Casos sin daño en el núcleo	55	63 (68*)	-
Casos con daño en el núcleo	70	62 (57*)	-

# Resultados LBLOCA. ATF

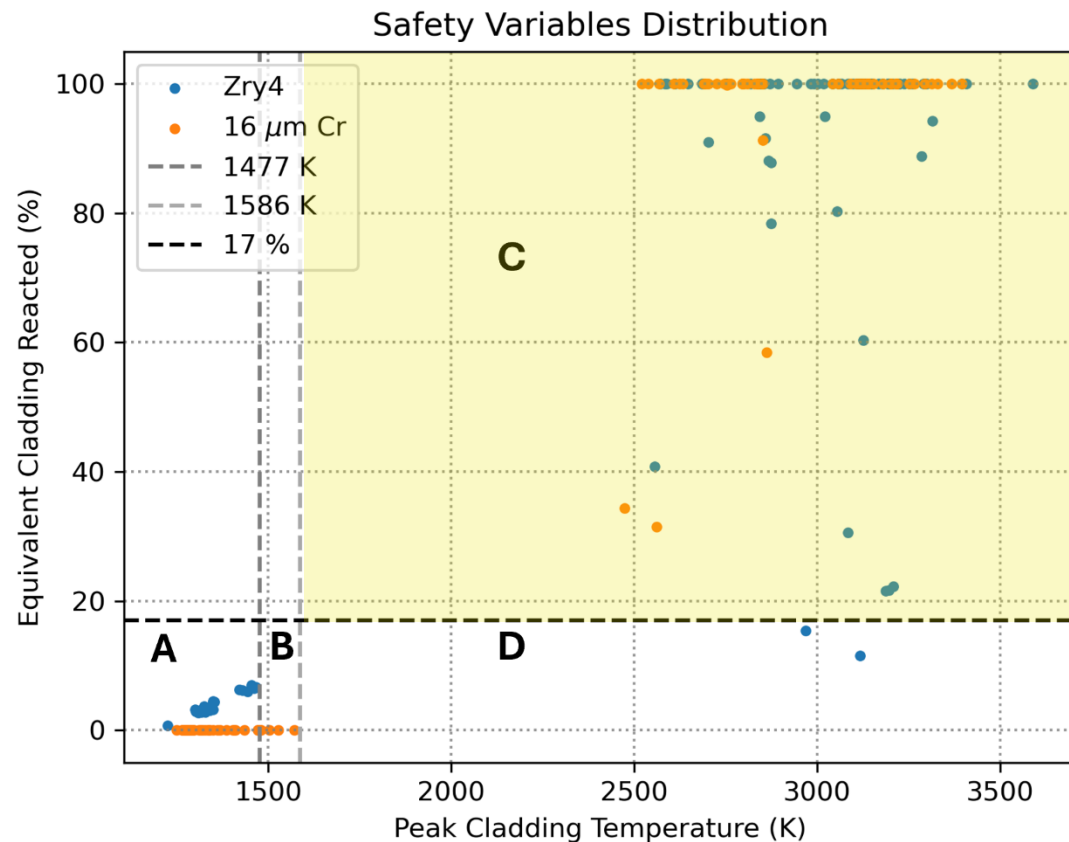
- En las regiones A y B, no hay ningún caso con ECR cercano a 17%



	Zry4	ATF (16 $\mu\text{m}$ Cr)	Proveniente de
<b>Región A</b>			
PCT < 1477 K	55	63	Región A (55)
ECR < 17 %			Región C (6)
			Región D (2)
<b>Región B</b>			
1477 K $\leq$ PCT < 1586 K	0	5	Región C (5)
ECR < 17 %			
<b>Región C</b>			
PCT $\geq$ 1586 K	68	57	Región C (57)
ECR $\geq$ 17 %			
<b>Región D</b>			
PCT $\geq$ 1586 K	2	0	-
ECR < 17 %			
Casos sin daño en el núcleo	55	63 (68*)	-
Casos con daño en el núcleo	70	62 (57*)	-

# Resultados LBLOCA. ATF

- En las regiones A y B, no hay ningún caso con ECR cercano a 17%
- En la región C, casi todas las secuencias presentan un ECR del 100%
  - El revestimiento de Cr pierde su integridad por alcanzar  $T_{Cr} > 1586$  K

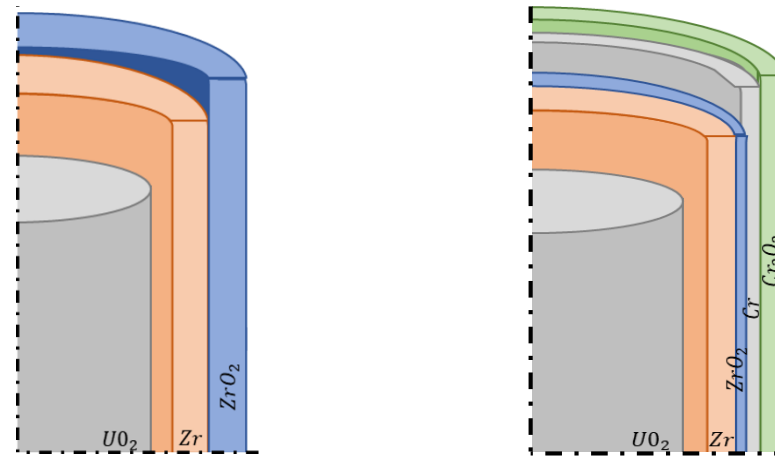


	Zry4	ATF (16 $\mu$ m Cr)	Proveniente de
<b>Región A</b>			
PCT < 1477 K	55	63	Región A (55)
ECR < 17%			Región C (6)
			Región D (2)
<b>Región B</b>			
1477 K $\leq$ PCT < 1586 K	0	5	Región C (5)
ECR < 17%			
<b>Región C</b>			
PCT $\geq$ 1586 K	68	57	Región C (57)
ECR $\geq$ 17%			
<b>Región D</b>			
PCT $\geq$ 1586 K	2	0	-
ECR < 17%			
Casos sin daño en el núcleo	55	63 (68*)	-
Casos con daño en el núcleo	70	62 (57*)	-

# Límites de seguridad

- El sentido físico del ECR cambia según el tipo de combustible

$ECR_{ZrY4}$ : *Fracción de Zr consumida (en relación al espesor inicial de la vaina), asumiendo que todo el oxígeno que ha reaccionado con la vaina y que se ha difundido a través del material se emplea para formar  $ZrO_2$*



El mecanismo de oxidación del ATF cromado es distinto

- Se sugiere redefinir el límite del ECR para el ATF cromado:
  - Desarrollando nuevas correlaciones
  - Usando correlaciones para combustible estándar (ej. Baker-Just), pero encontrando el nuevo límite ECR para el que se mantiene la ductilidad de las barras de ATF cromado

# Proyecto ATF

**Paso 1** Investigación bibliográfica de los modelos de oxidación

**Paso 2** Evaluación de las necesidades del código RELAP/SCDAP

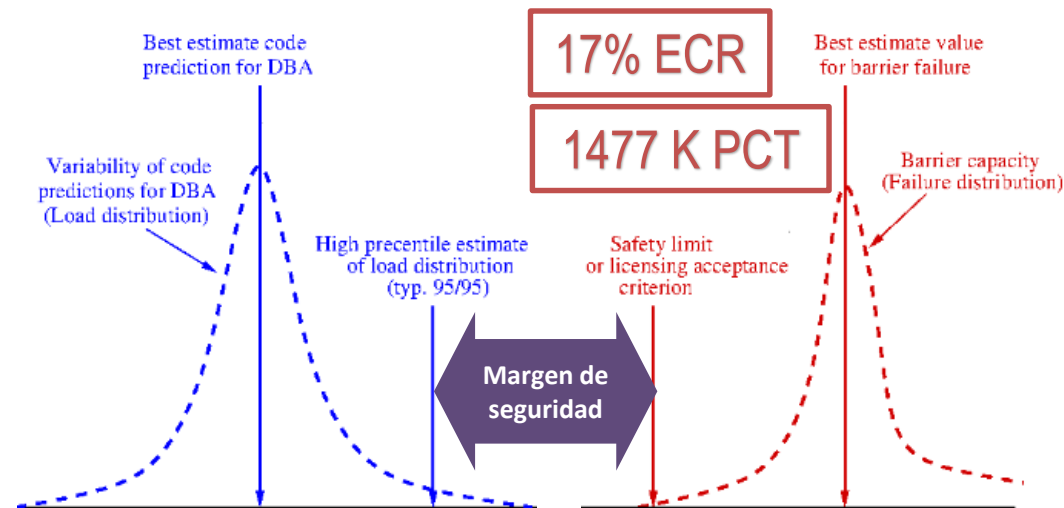
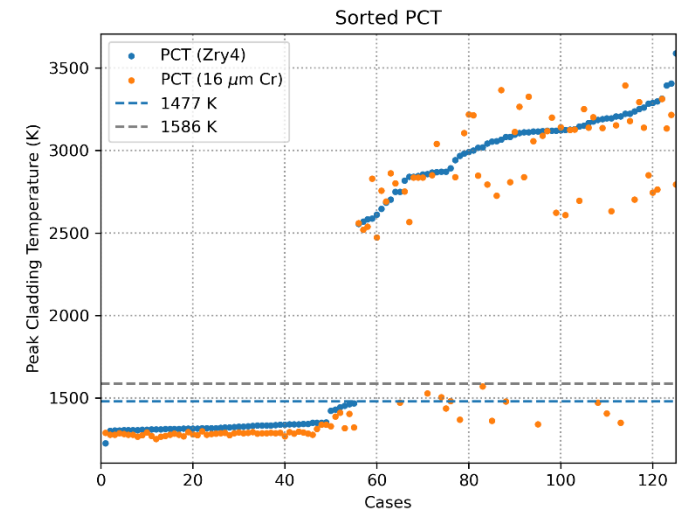
**Paso 3** Implementación de un nuevo modelo de oxidación

**Paso 4** V&V del nuevo modelo

**Paso 5** Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

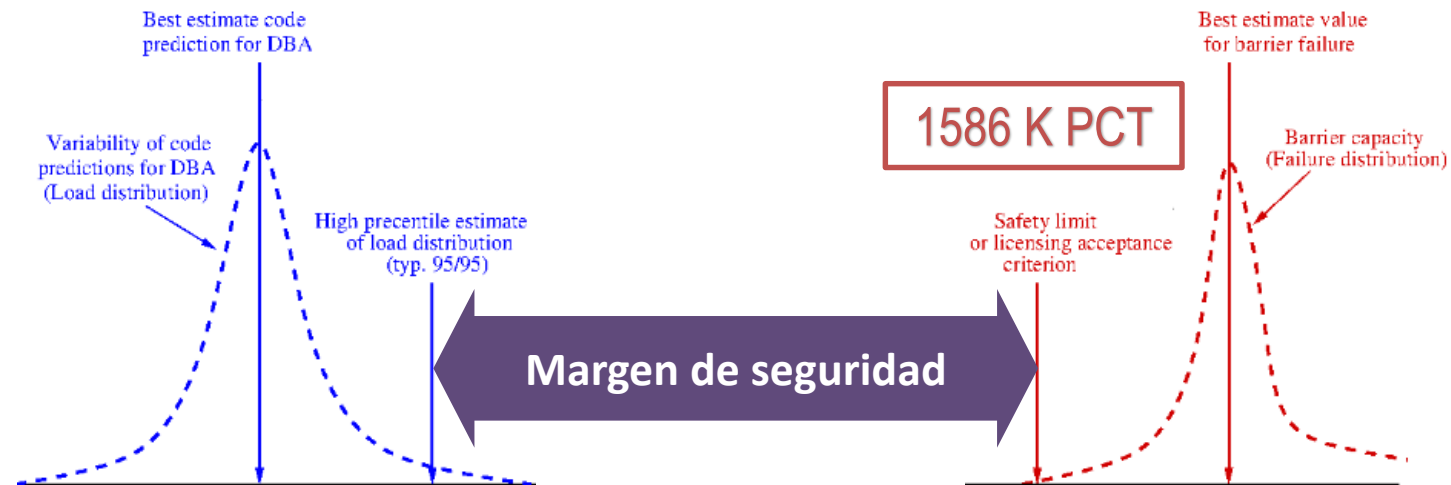
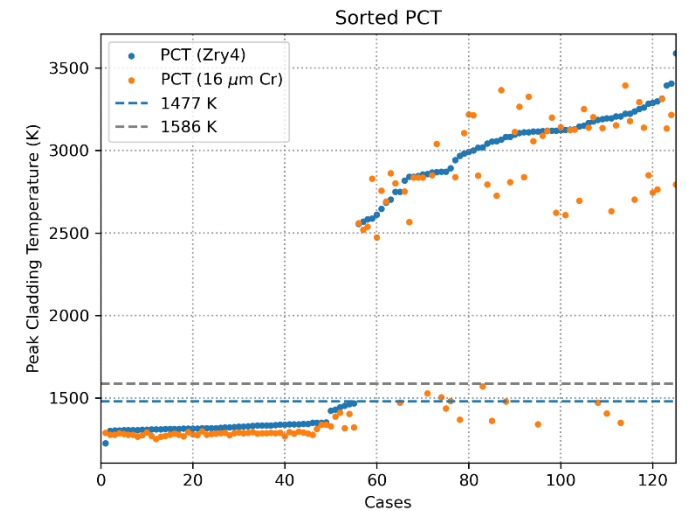
# Conclusiones

- Evaluación del impacto en los márgenes de seguridad durante secuencias LBLOCA:
  - El límite del ECR para ATF cromado debería redefinirse
  - De las 70/125 secuencias que presentaban daño en el núcleo con Zry4, sólo 13 lo evitarían
  - El ATF cromado incrementa significativamente los márgenes de seguridad para las secuencias sin daño
  - El ATF cromado podría permitir aumentar el límite de la PCT, al menos hasta la temperatura de formación del eutéctico Zr-Cr (1586 K)



# Conclusiones

- Evaluación del impacto en los márgenes de seguridad durante secuencias LBLOCA:
  - El límite del ECR para ATF cromado debería redefinirse
  - De las 70/125 secuencias que presentaban daño en el núcleo con Zry4, sólo 13 lo evitarían
  - El ATF cromado incrementa significativamente los márgenes de seguridad para las secuencias sin daño
  - El ATF cromado podría permitir aumentar el límite de la PCT, al menos hasta la temperatura de formación del eutéctico Zr-Cr (1586 K)



# Análisis de escenarios DEC con reinundación de núcleo para combustible ATF cromado

Jordi Freixa Terradas  
[terradas@upc.edu](mailto:terradas@upc.edu)

Marina Pérez Ferragut

Víctor Martínez Quiroga

Adrián González Briones

Iván Bravo

[jordi.freixa-](mailto:jordi.freixa-)

[marina.perez@upc.edu](mailto:marina.perez@upc.edu)

[victor.martinez.quiroga@upc.edu](mailto:victor.martinez.quiroga@upc.edu)

[adrian.gonzalez.briones@upc.edu](mailto:adrian.gonzalez.briones@upc.edu)

[bravo.ivangabriel@gmail.com](mailto:bravo.ivangabriel@gmail.com)