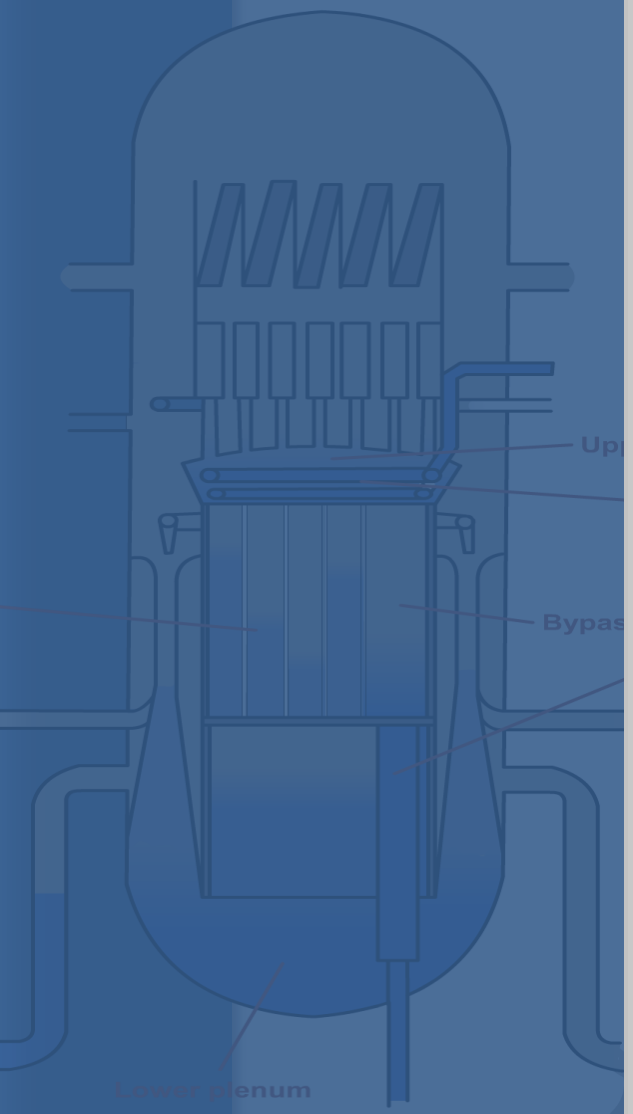


ETSEIB

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

UPC UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

ANT

https://ant.upc.edu

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

Jordi Freixa Terradas jordi.freixa-terradas@upc.edu

Marina Pérez Ferragut marina.perez@upc.edu

Víctor Martínez Quiroga victor.martinez.quiroga@upc.edu

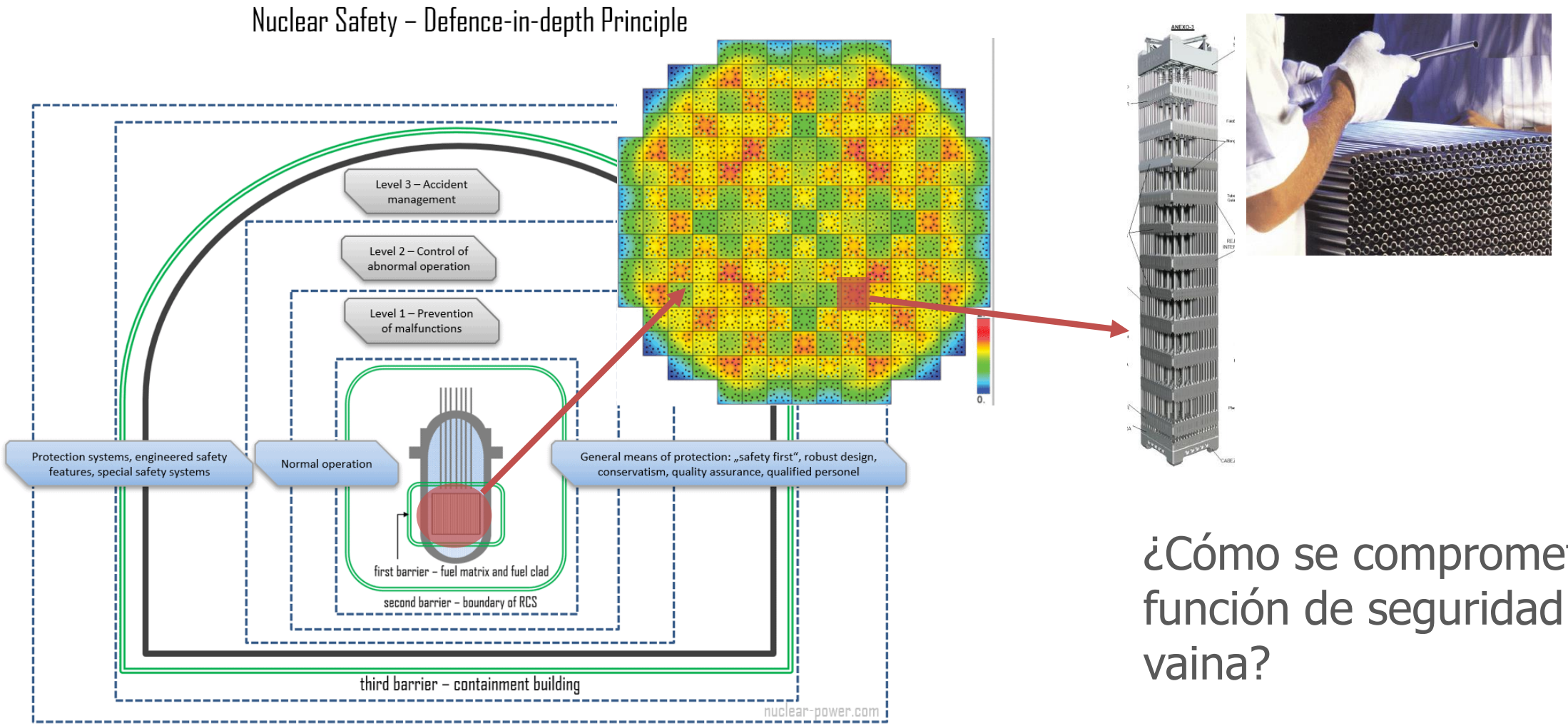
Adrián González Briones adrian.gonzalez.briones@upc.edu

Iván Bravo bravo.ivangabriel@gmail.com

11 de junio de 2026

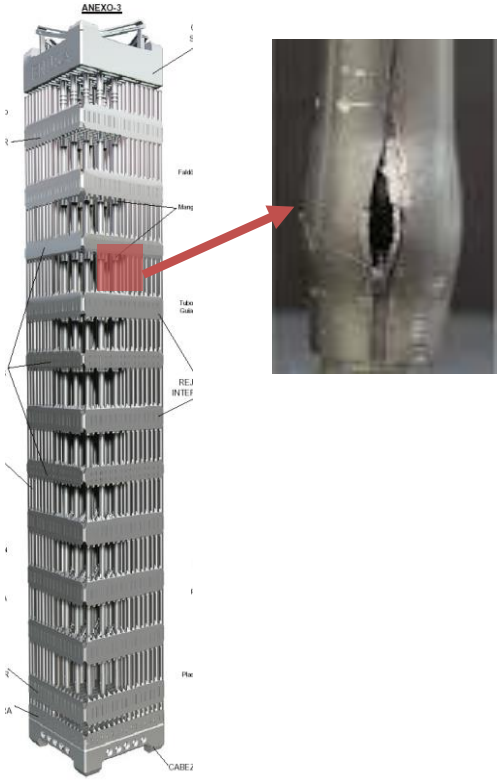
ANT UPC UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

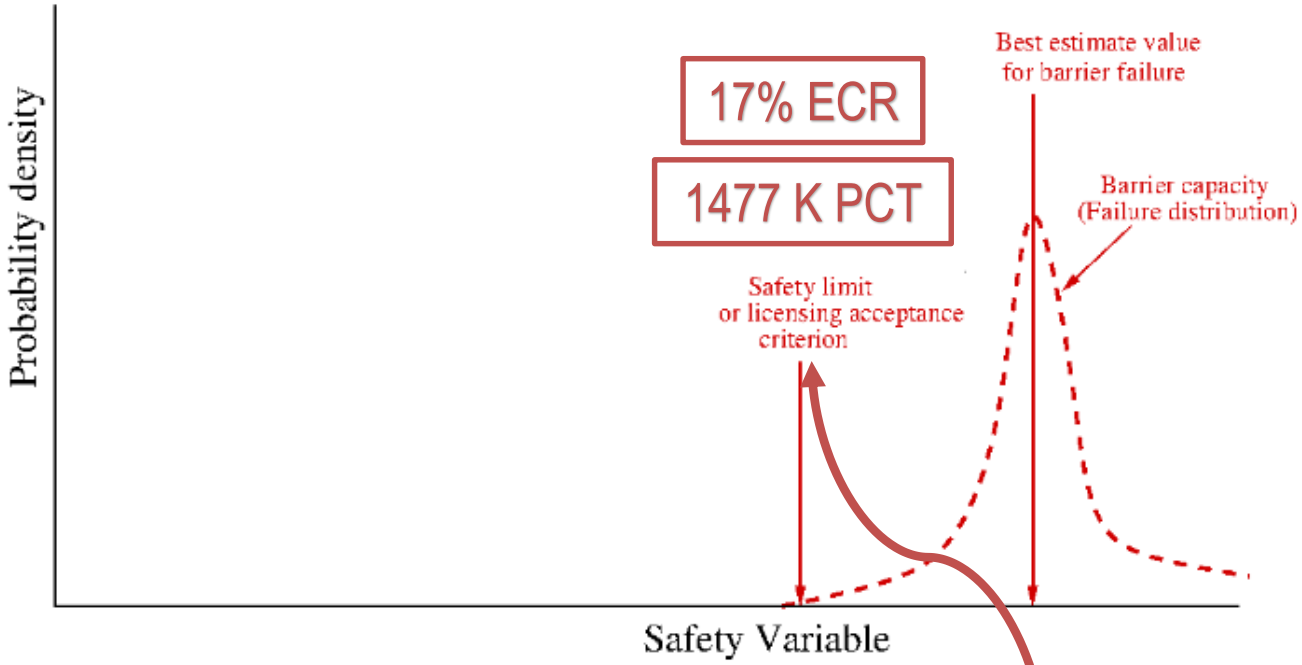
Defensa en profundidad, barreras, la vaina



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

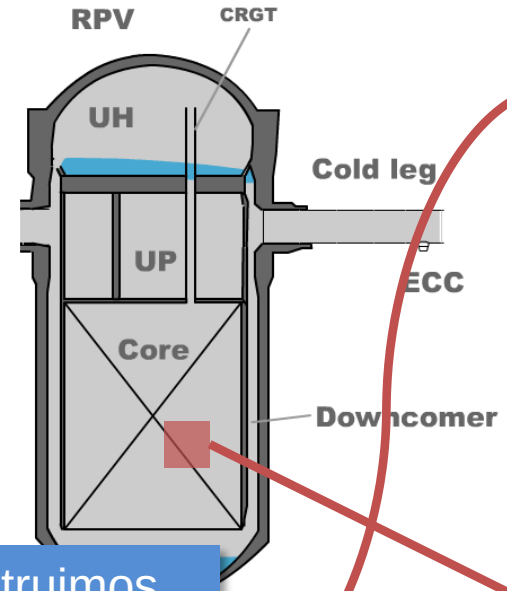
Márgenes de seguridad





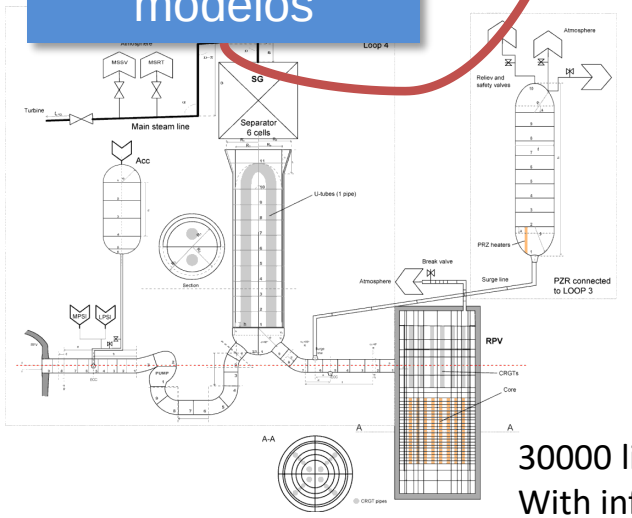
Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

Escenarios base de diseño: LOCA



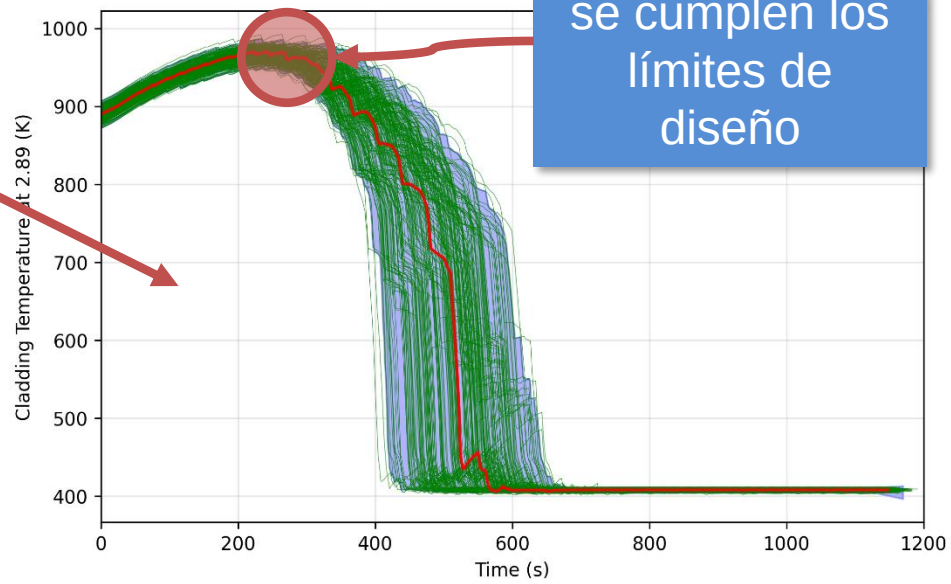
Para simular el comportamiento de la planta

Construimos modelos



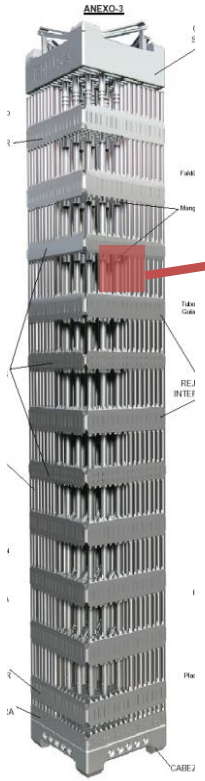
30000 lines of text
With information

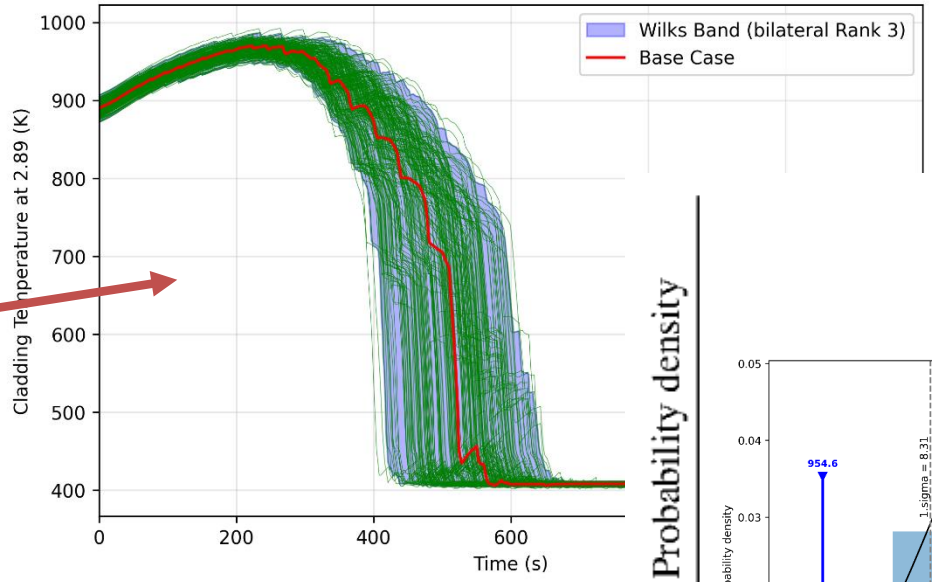
Y evaluar que se cumplen los límites de diseño

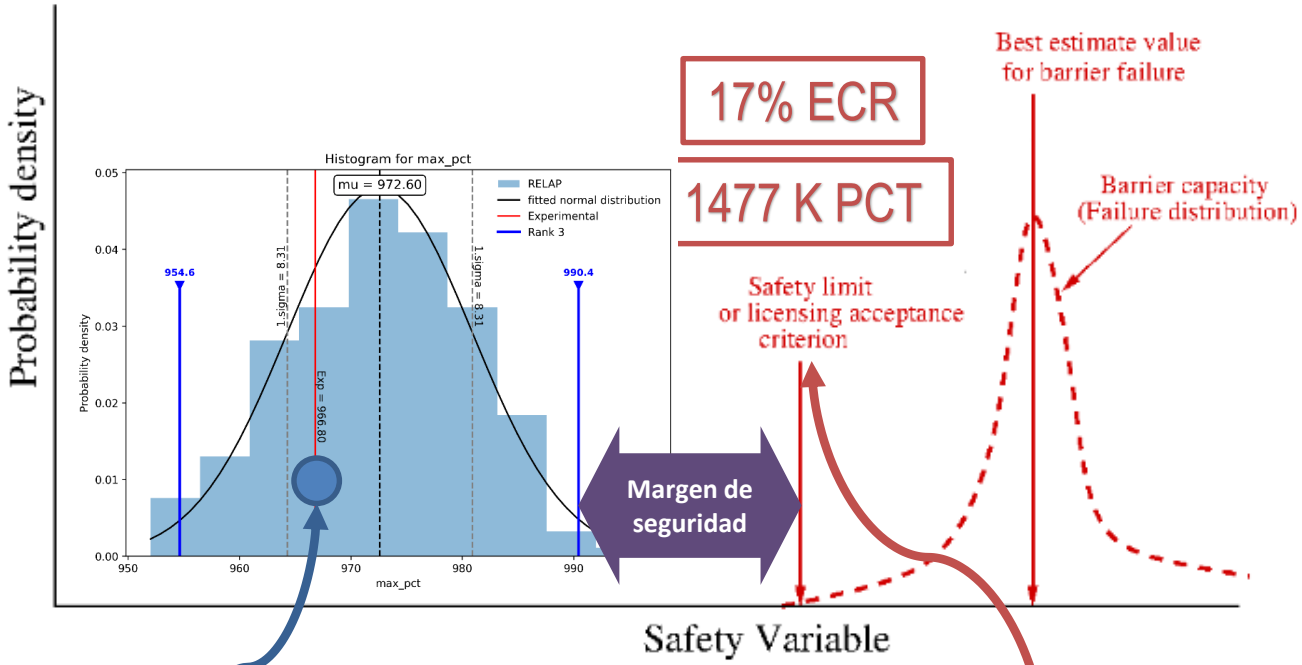


ANT
UPC UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

Márgenes de seguridad





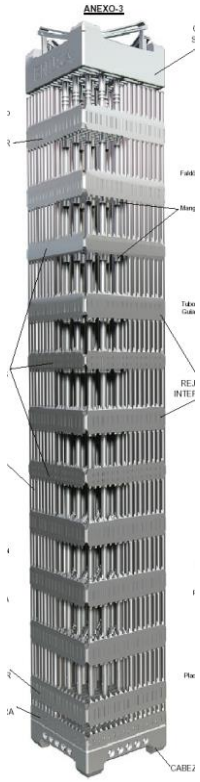


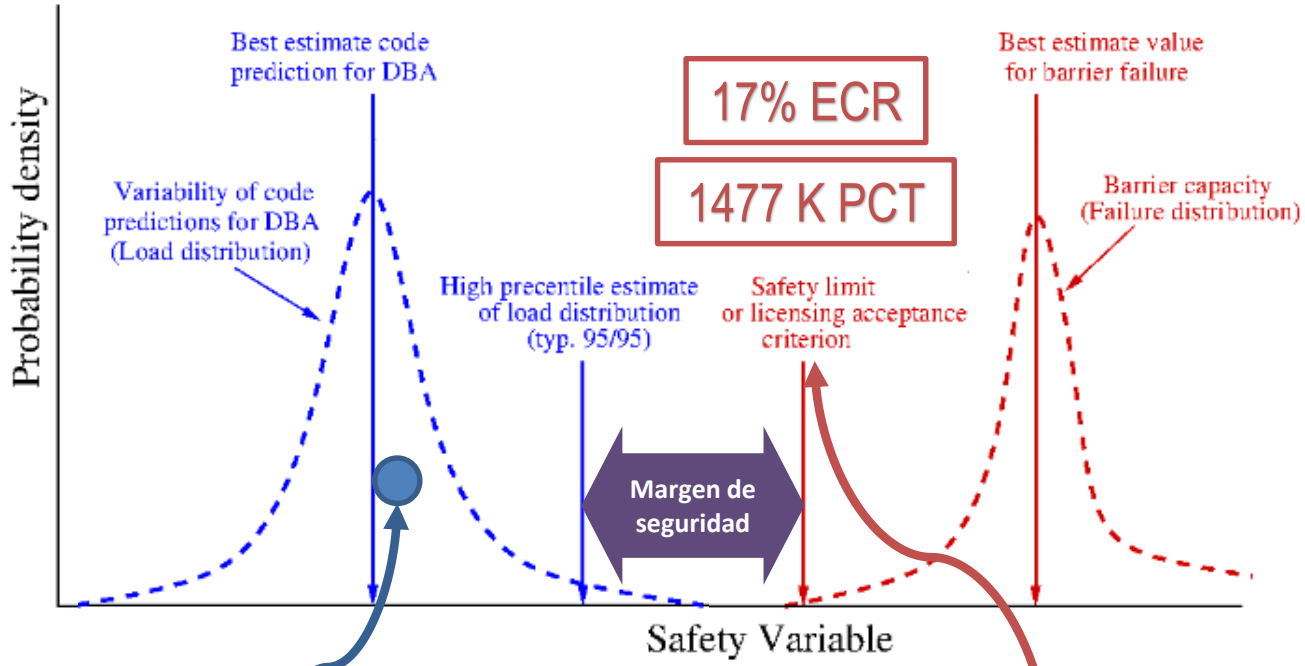
Respuesta real (desconocida) al accidente

Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

ANT
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

Márgenes de seguridad



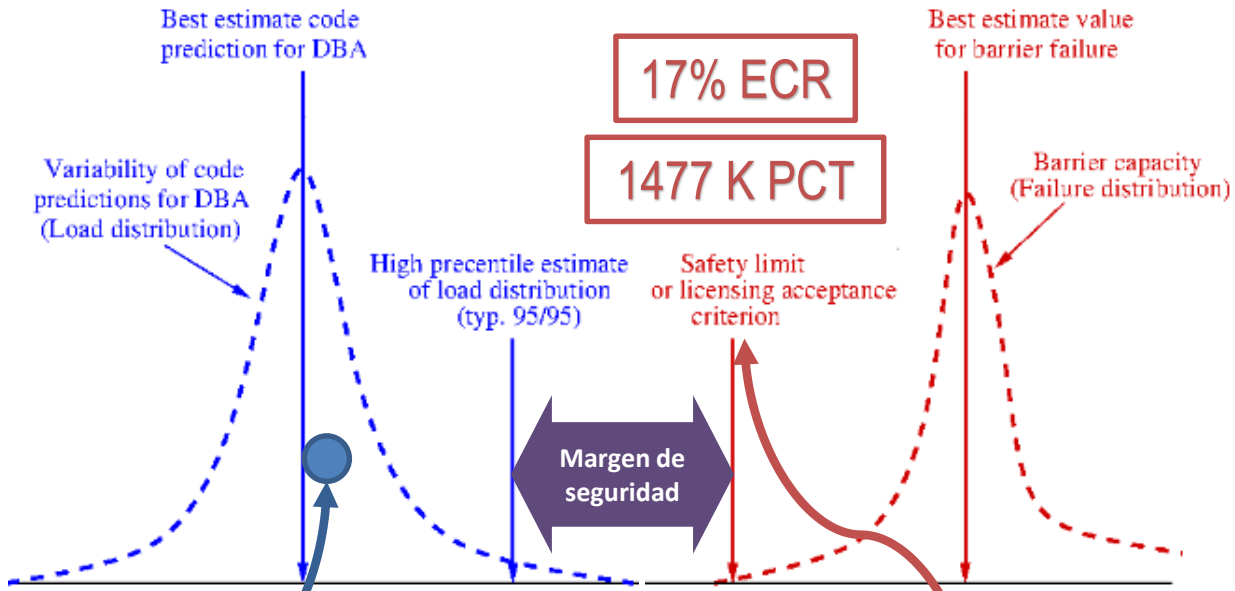


Respuesta real (desconocida) al accidente

Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la respuesta del sistema



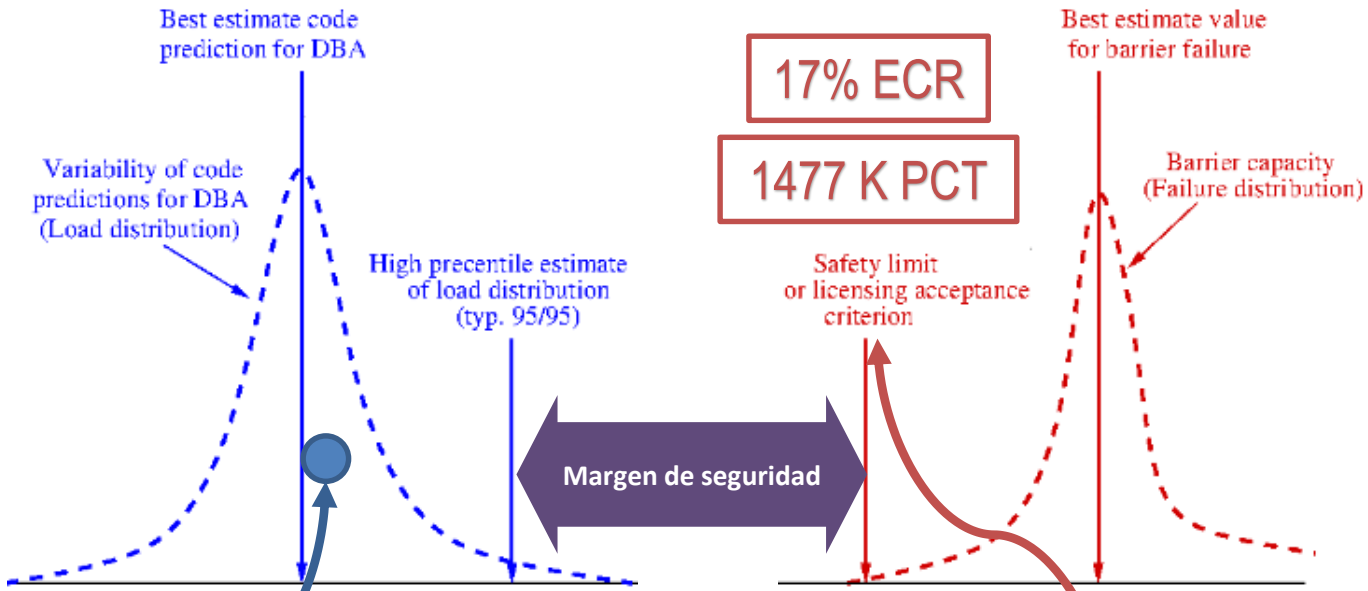
Respuesta real (desconocida) al accidente

Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la respuesta del sistema

Mejorar la Resistencia de la propia barrera



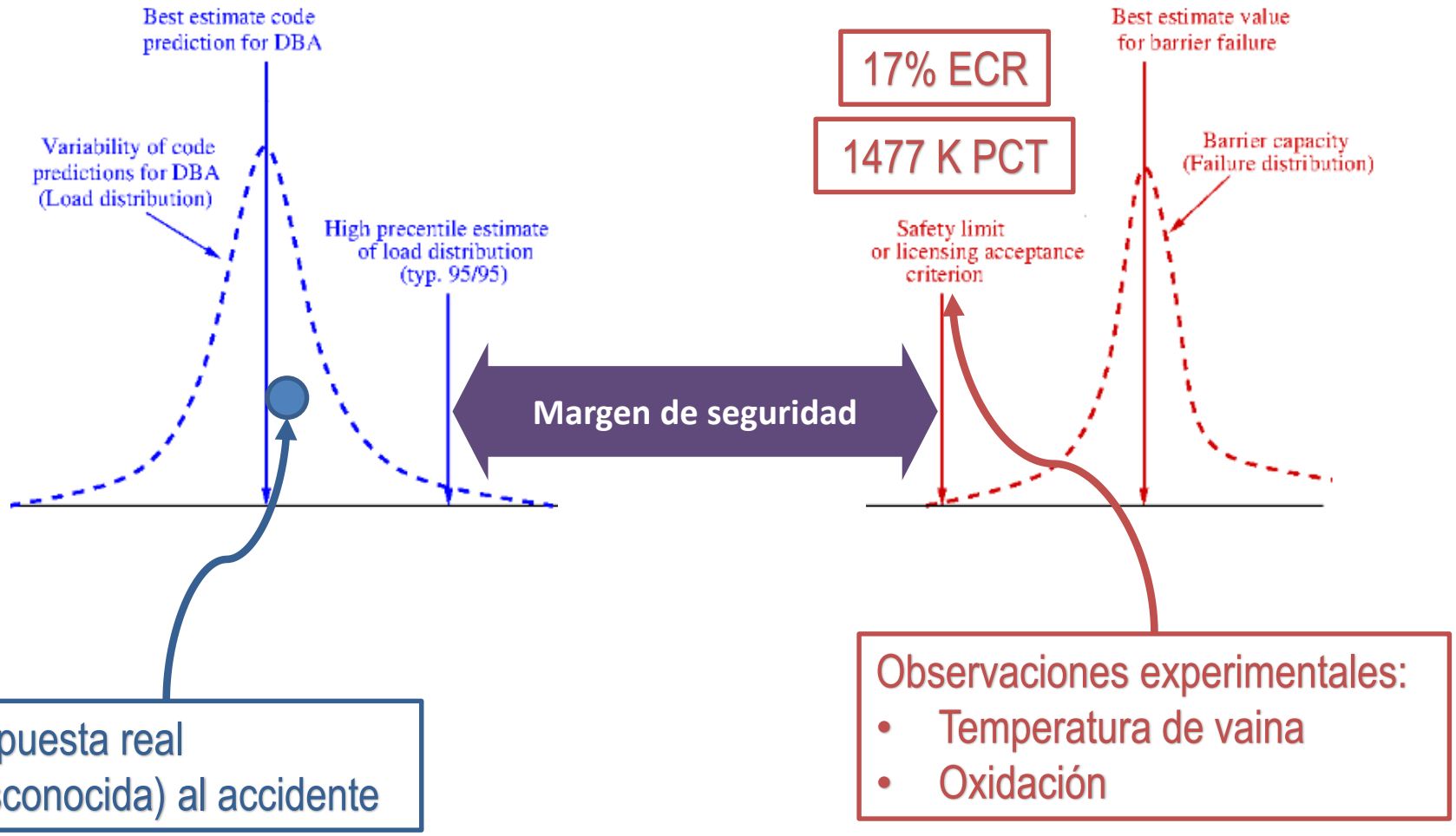
Respuesta real (desconocida) al accidente

Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la respuesta del sistema

Mejorar la Resistencia de la propia barrera



Respuesta real (desconocida) al accidente

Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

Mejorar los márgenes de seguridad

Mejorar la respuesta del sistema

Mejorar la precisión de las predicciones

Mejorar la Resistencia de la propia barrera



Respuesta real (desconocida) al accidente

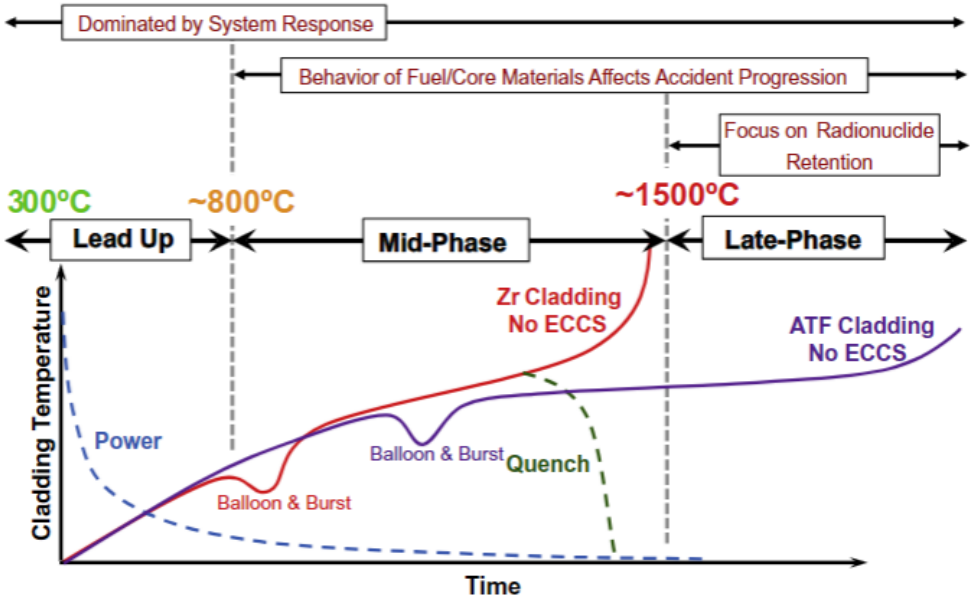
Observaciones experimentales:
- Temperatura de vaina
- Oxidación

ATF Advanced Technological Fuel

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

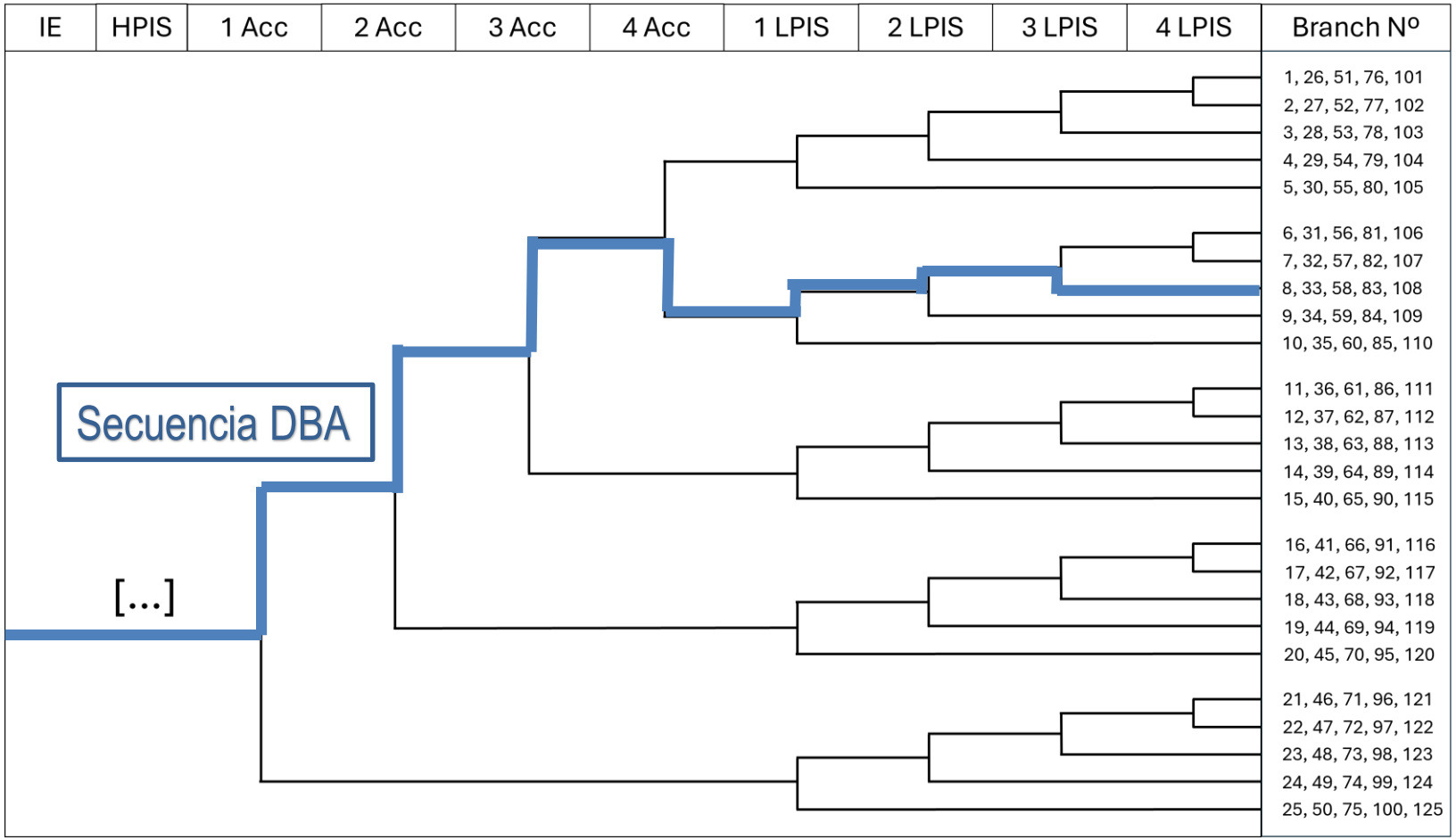
$$Zr + 2\,H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2\,H_2$$

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



- Diseños de combustible alternativo al 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

wnn 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

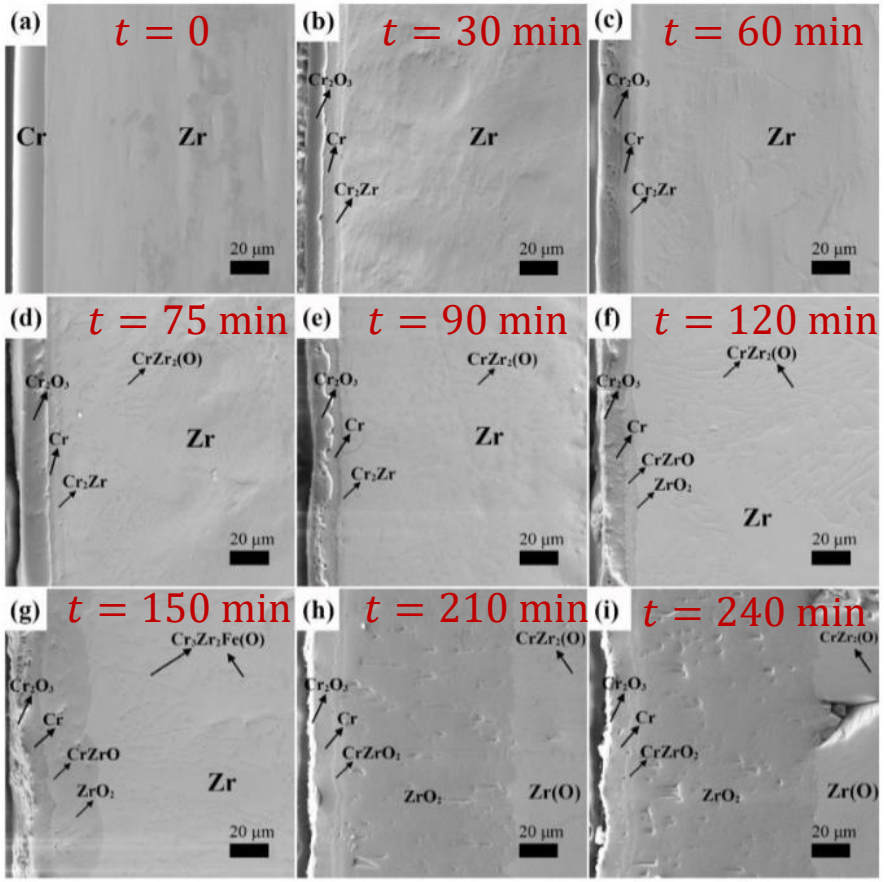
Paso 4 V&V del nuevo modelo

Paso 5 Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

Oxidación del ATF cromado

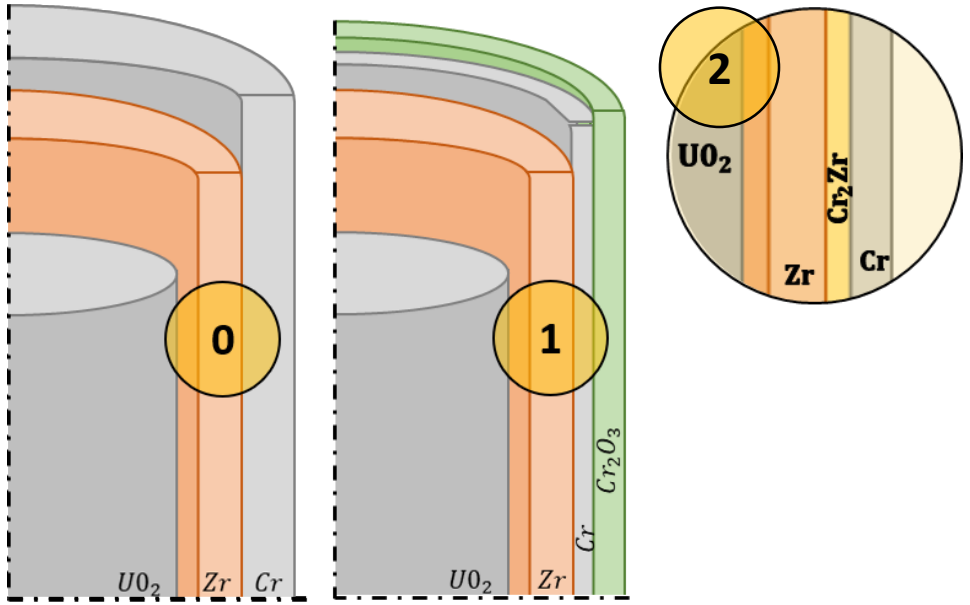
OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

Han et al.



16 μm de Cr; ambiente de vapor a 1473 K

RESUMEN

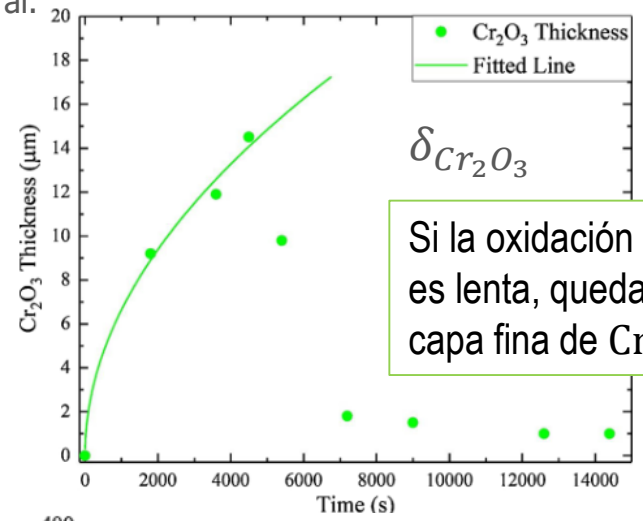


Oxidación del ATF cromado

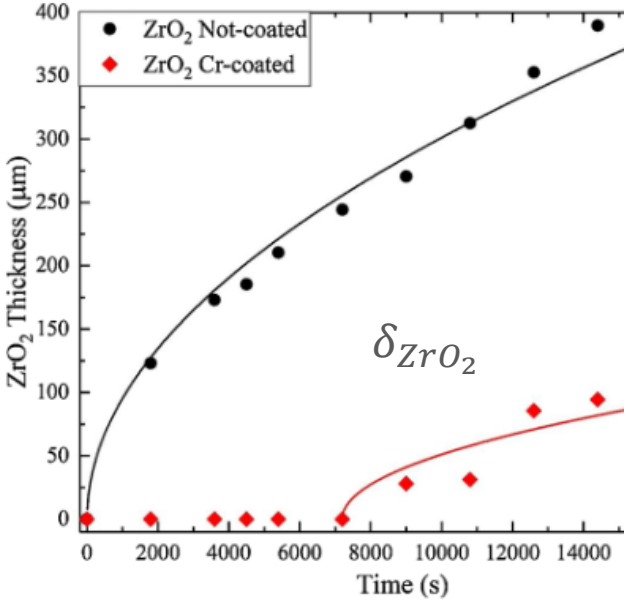
OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

Han et al.

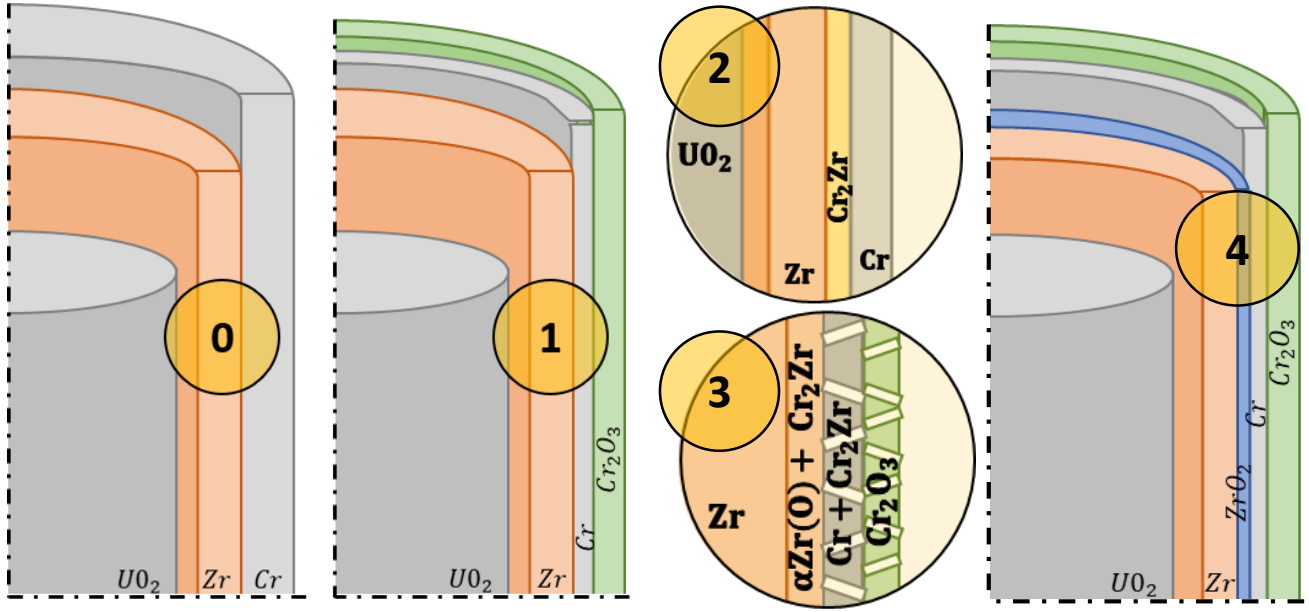
16 µm de Cr; ambiente de vapor a 1473 K



Si la oxidación de Cr es lenta, queda una capa fina de Cr_2O_3



RESUMEN



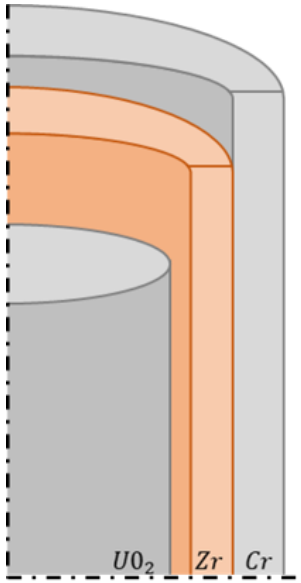
$$Zr + 2\,H_2O \rightarrow \mathbf{ZrO_2} + 2\,H_2$$
$$Cr_2Zr + 2\,O \rightarrow \mathbf{ZrO_2} + 2\,Cr$$

El ATF cromado no evita la formación de ZrO_2, pero protege al Zry4 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 $Q_{oxidación}$

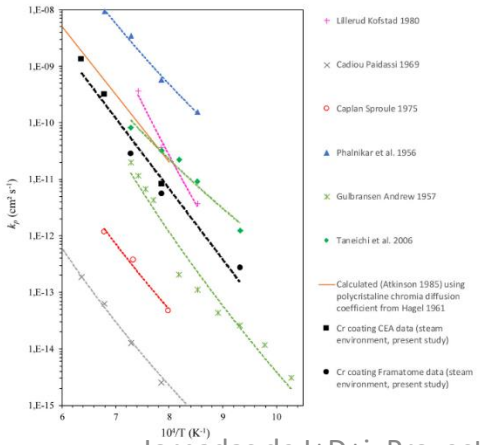
Modelo de oxidación del ATF cromado

- Se establecen distintos regímenes de oxidación del Zry4 según la evolución de:
  - $T_{Cr} \equiv$ Temperatura superficial de la vaina cromada [K]
  - $t(T_{Cr} \geq 1000\ \mathrm{K}) \equiv$ 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

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

$\bar{r}^2 = 0.9996$



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

δ_0 espesor inicial de cromia [m]

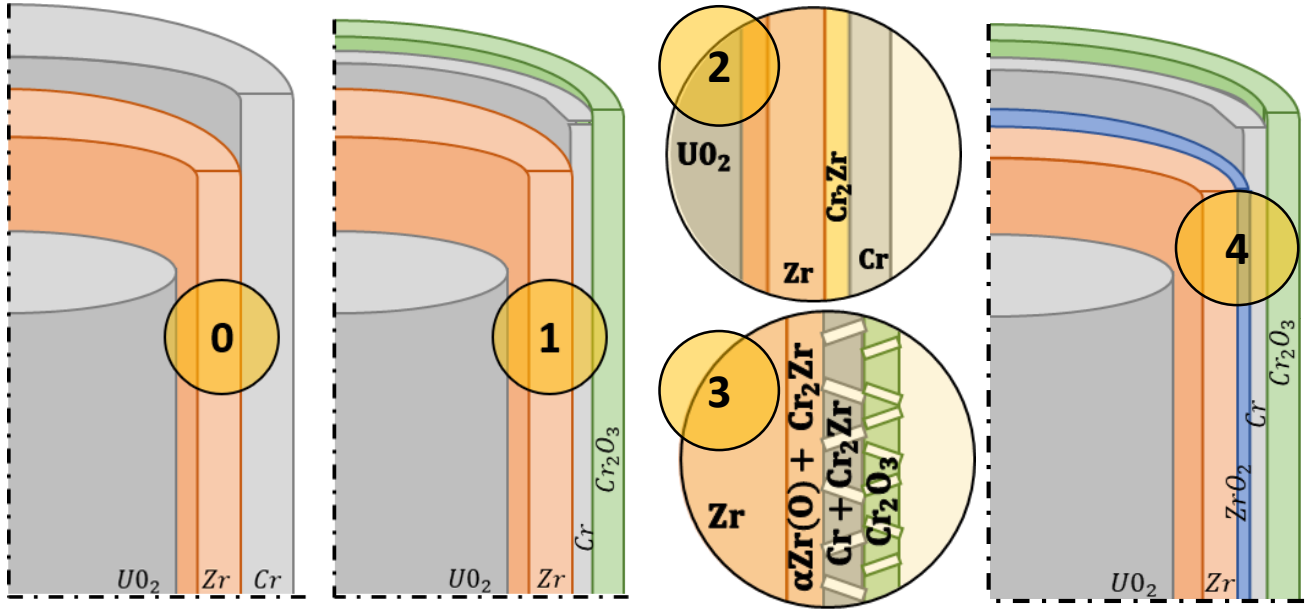
$\bar{A} = 2.6687 \cdot 10^{-3}$ constante de ajuste [$\mathrm{m^2 s^{-1}}$]

$\bar{B} = 38939$ constante de ajuste [K]

CEA y Framatome; revestimientos de 5 y 20 µm; vapor entre 1000 y 1573 K

Modelo de oxidación del ATF cromado

- Se imponen dos límites superiores para el fallo del revestimiento de Cr:
  - $\delta_{Cr_2O_3} \geq \varepsilon_1$ ⟹ el espesor de Cr inicial ε_1 se oxida por completo
  - $T_{Cr} \geq 1586\ \mathrm{K}$ ⟹ se llega al punto de formación del eutéctico Zr-Cr





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

Proyecto ATF

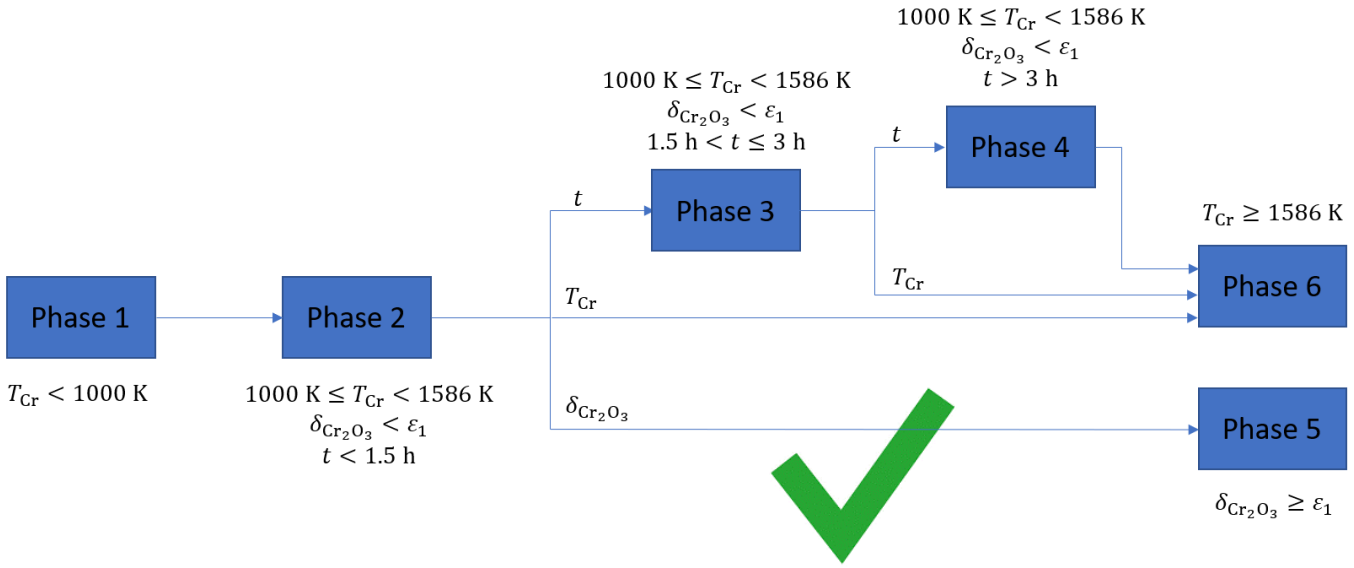
Paso 4

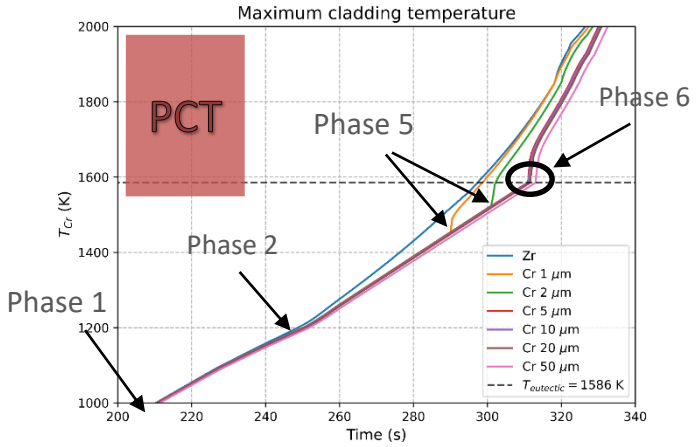
V&V del nuevo modelo

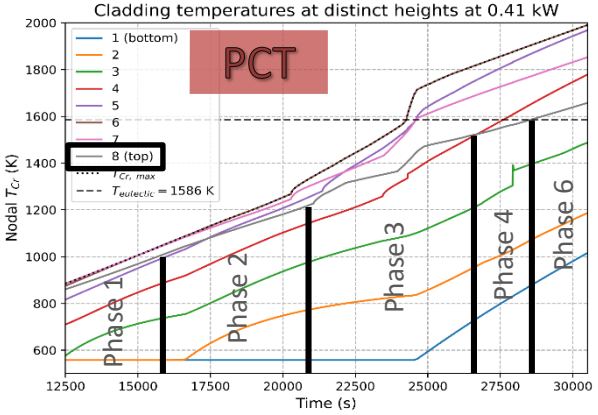
Paso 5 Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

Verificación del modelo de oxidación

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









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

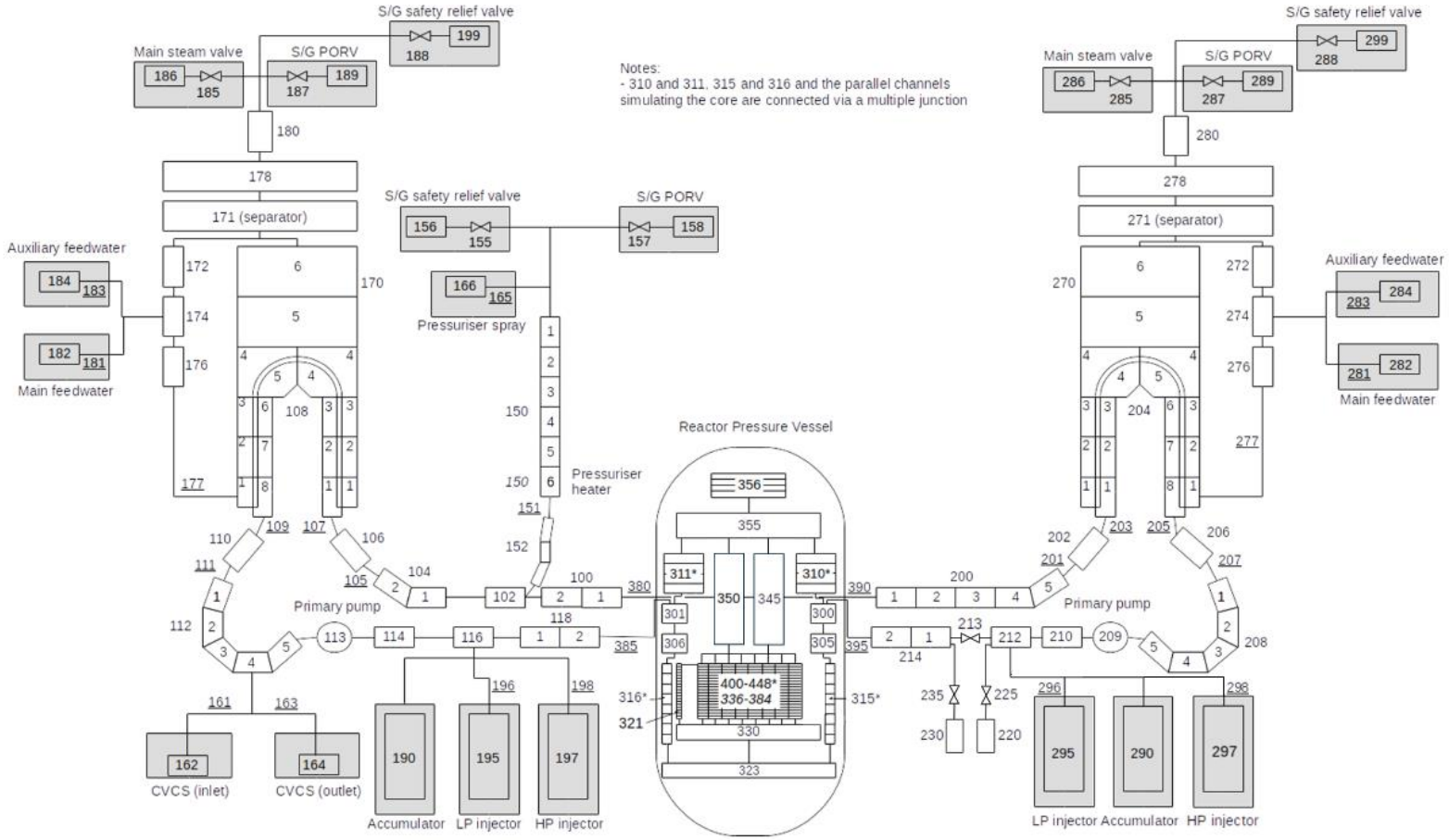
Proyecto ATF

Paso 5

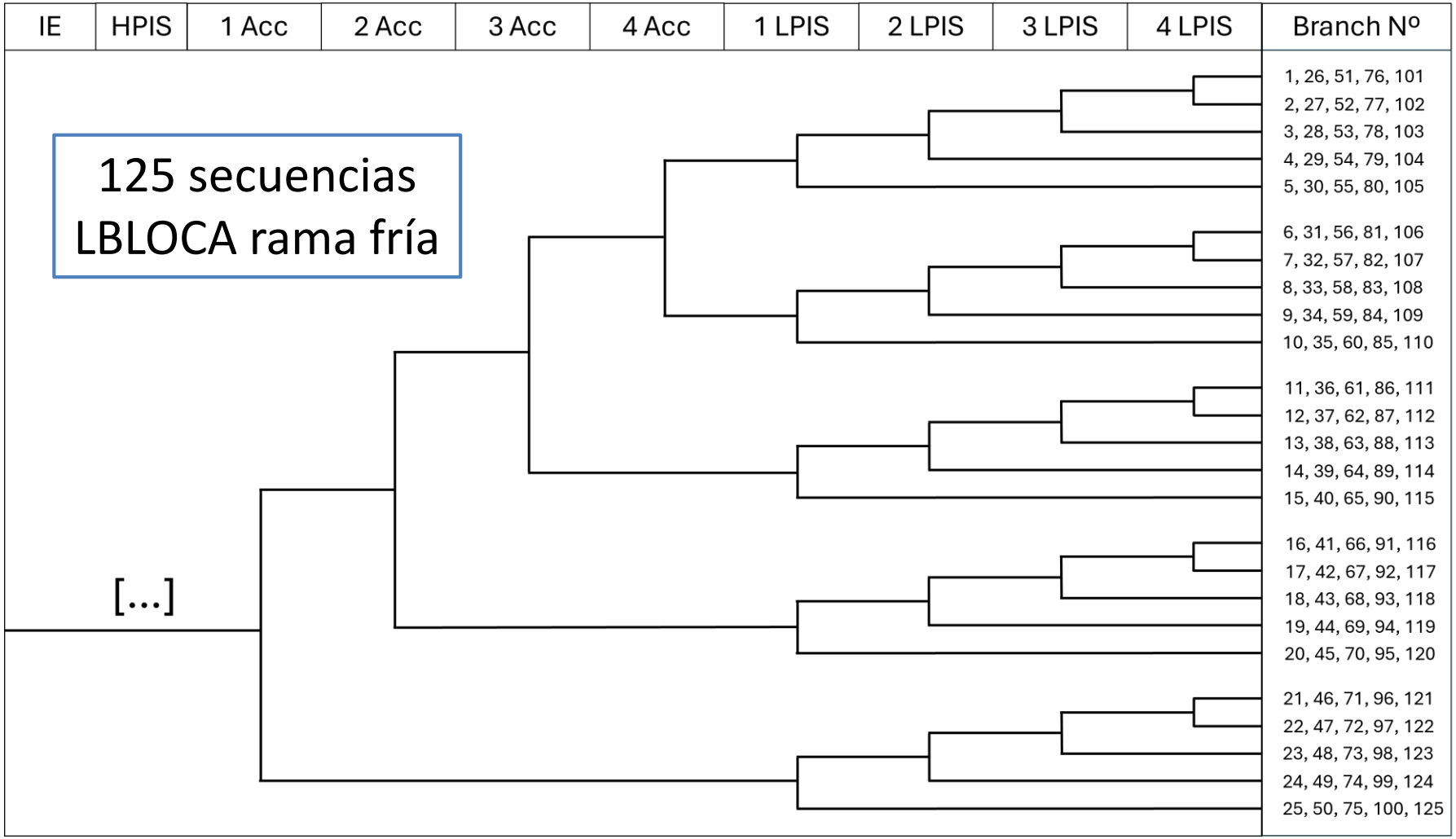
Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

Aplicación del modelo de oxidación

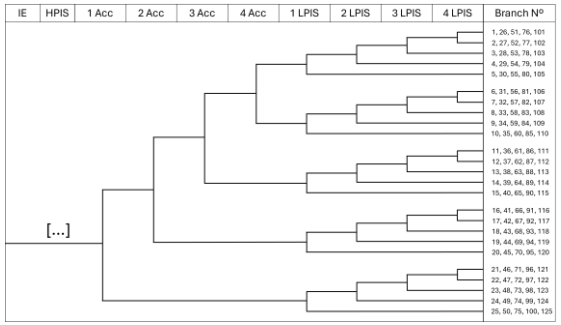
- Se usa un modelo en RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 de un PWR Westinghouse de 4 lazos (Zion)



Árbol de exploración de casos

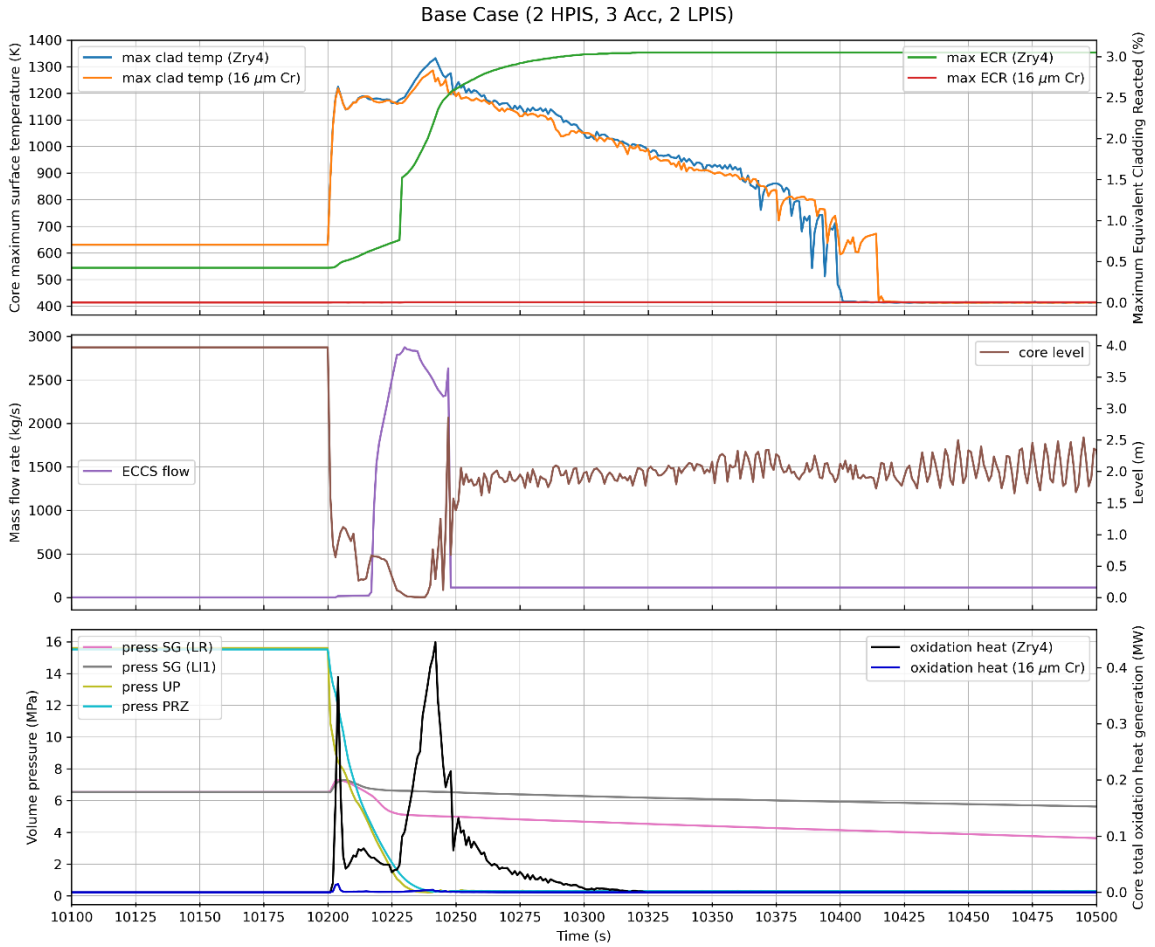


Árbol de exploración de casos

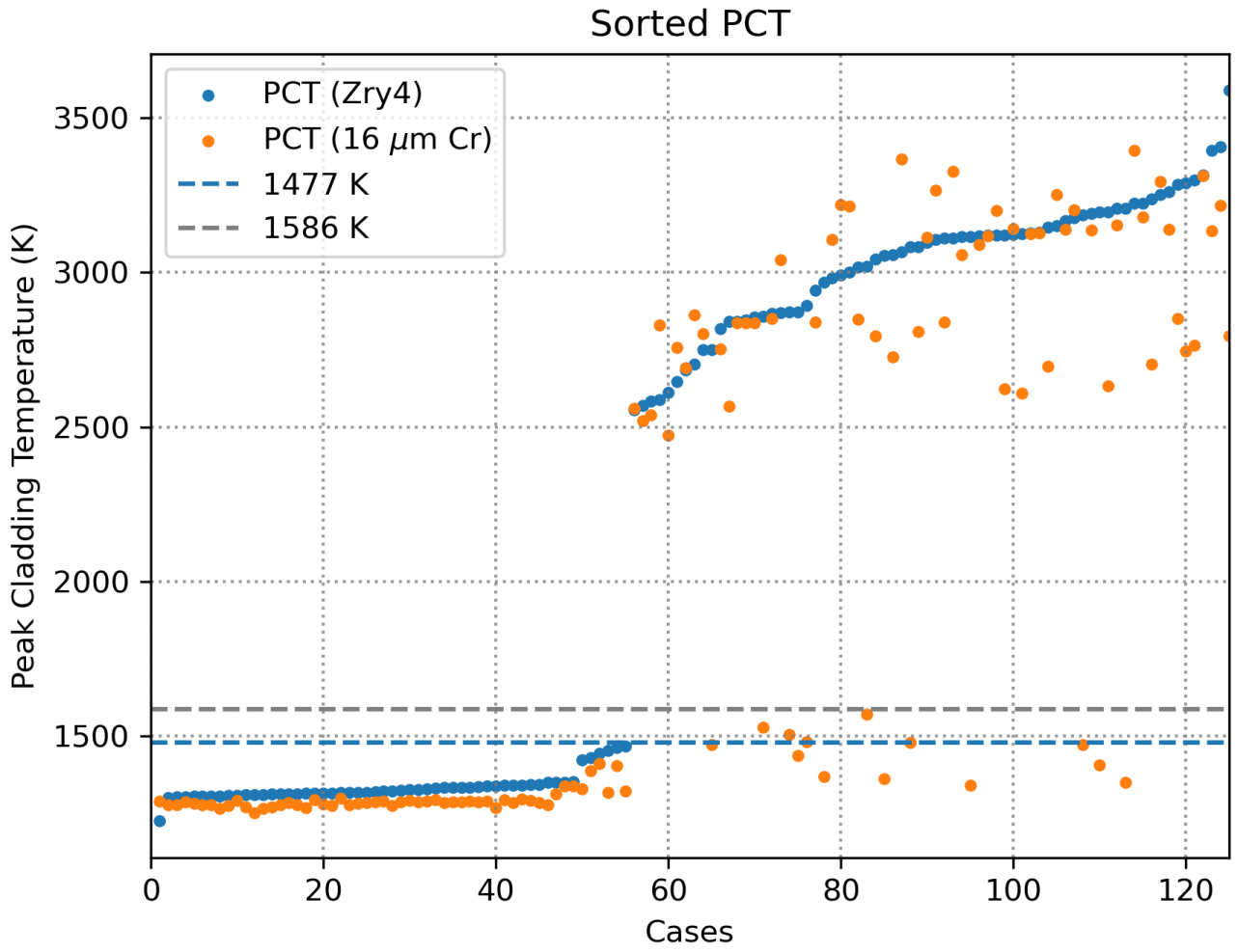


- Combustible estándar (Zry4)
- ATF cromado (16 um Cr)

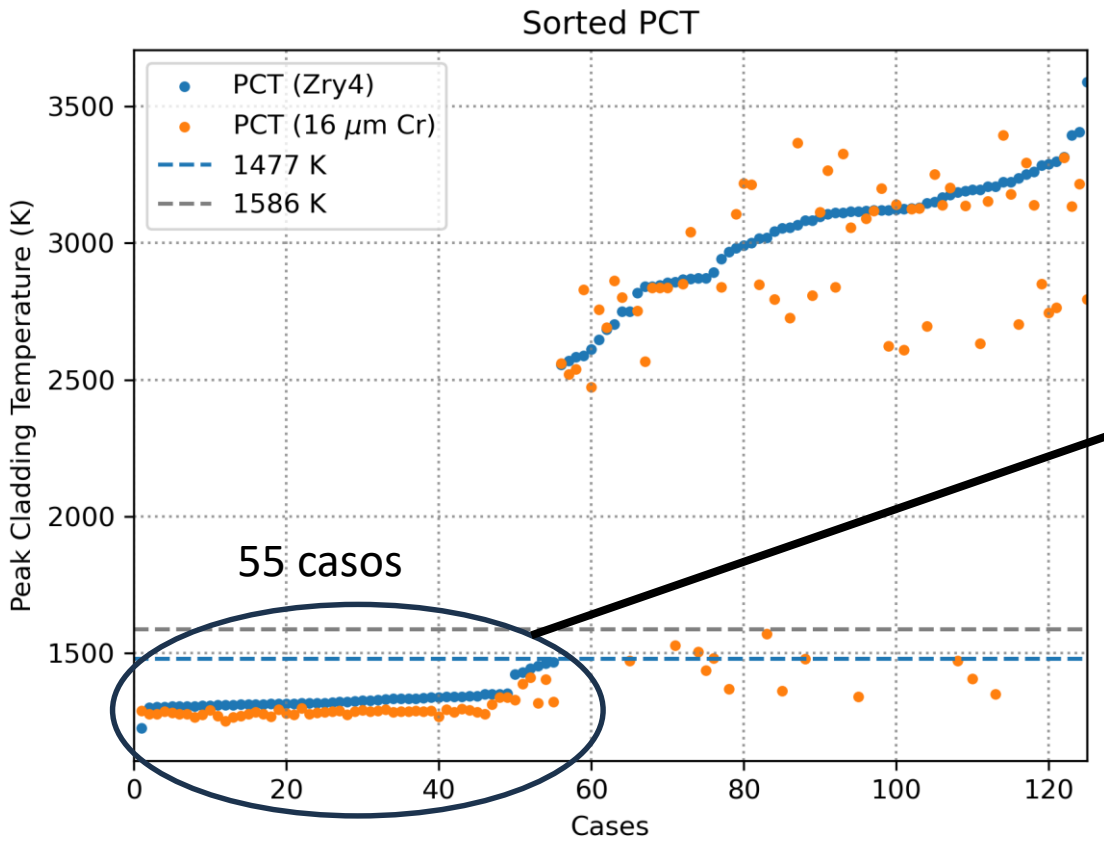
- PCT
- ECR máximo

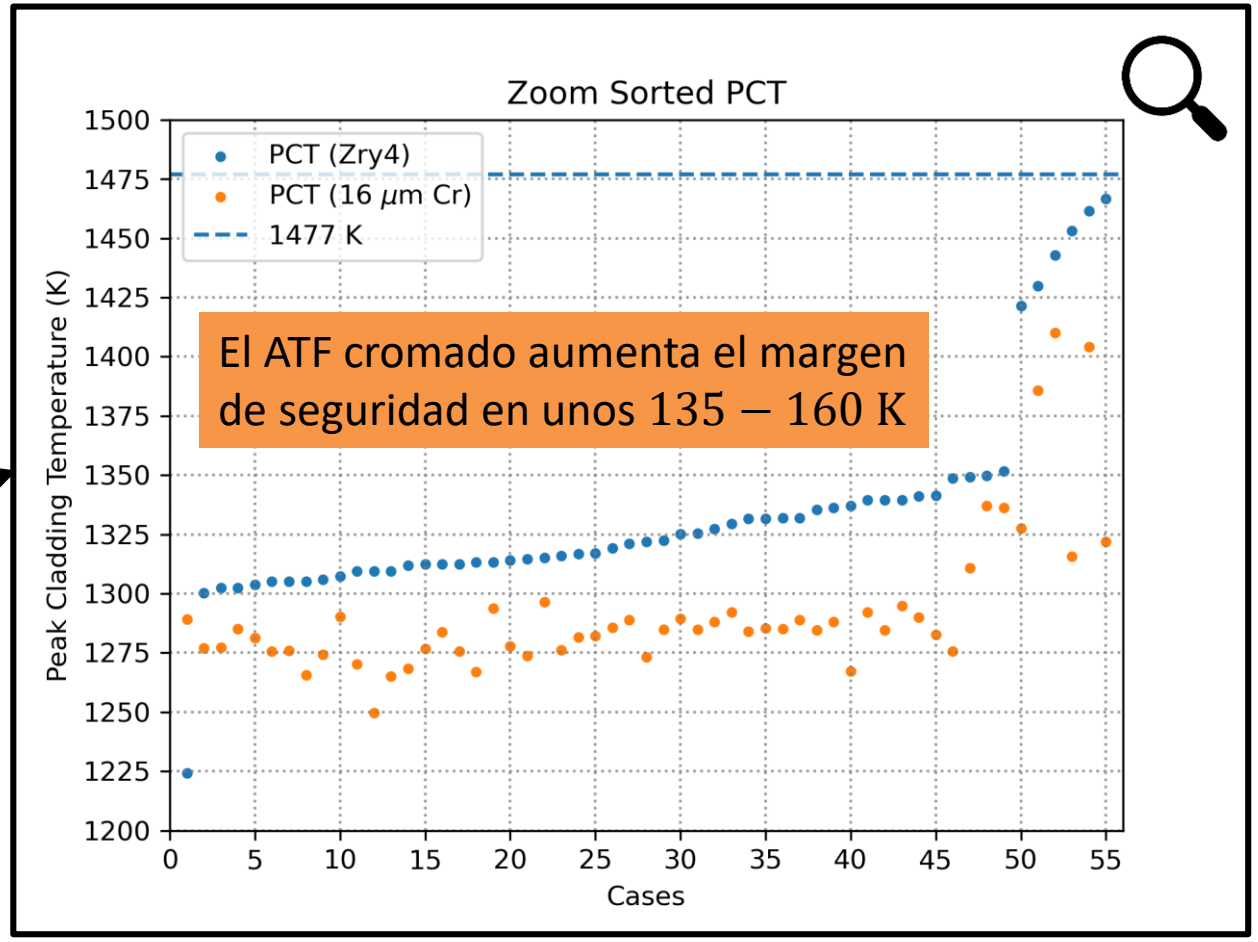


Resultados PCT

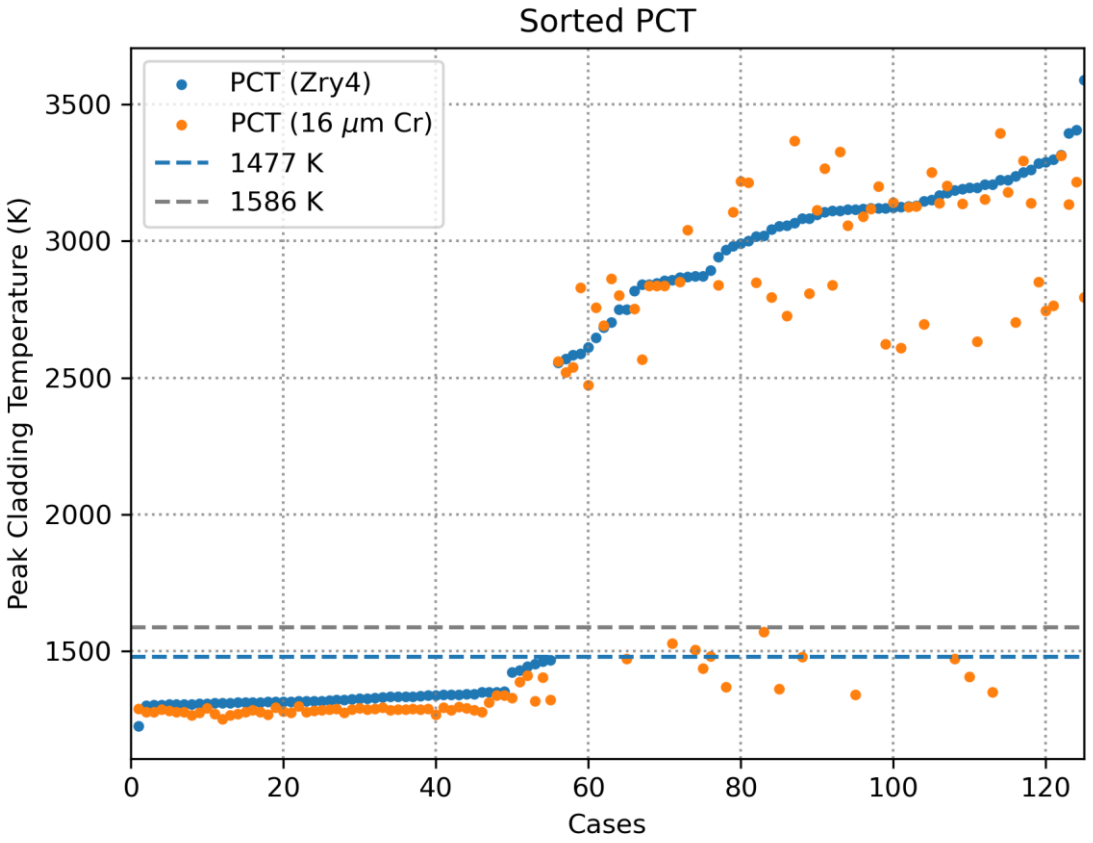


Resultados PCT

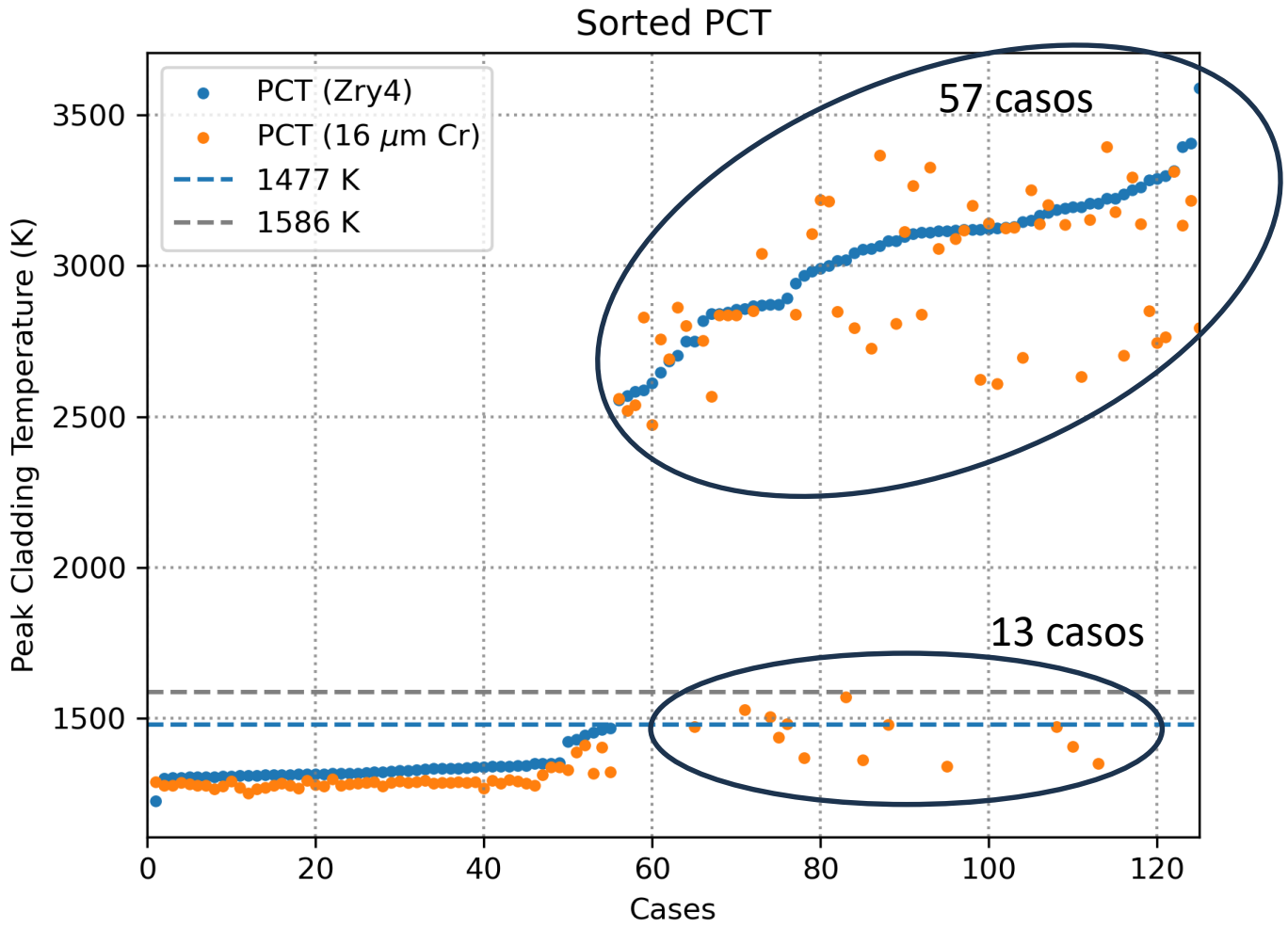




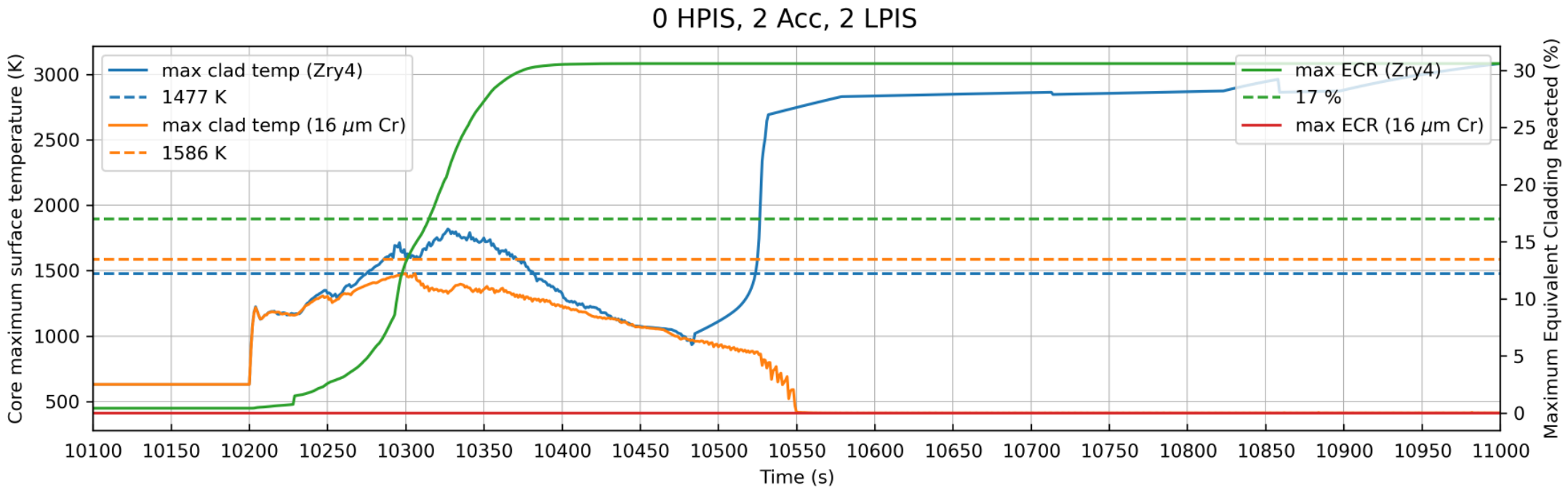
Resultados PCT

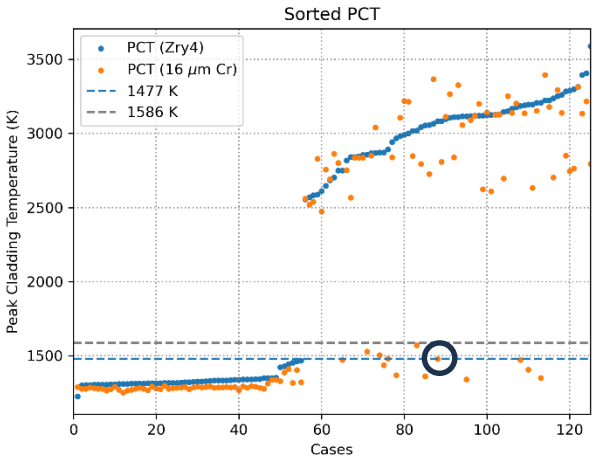


Resultados PCT

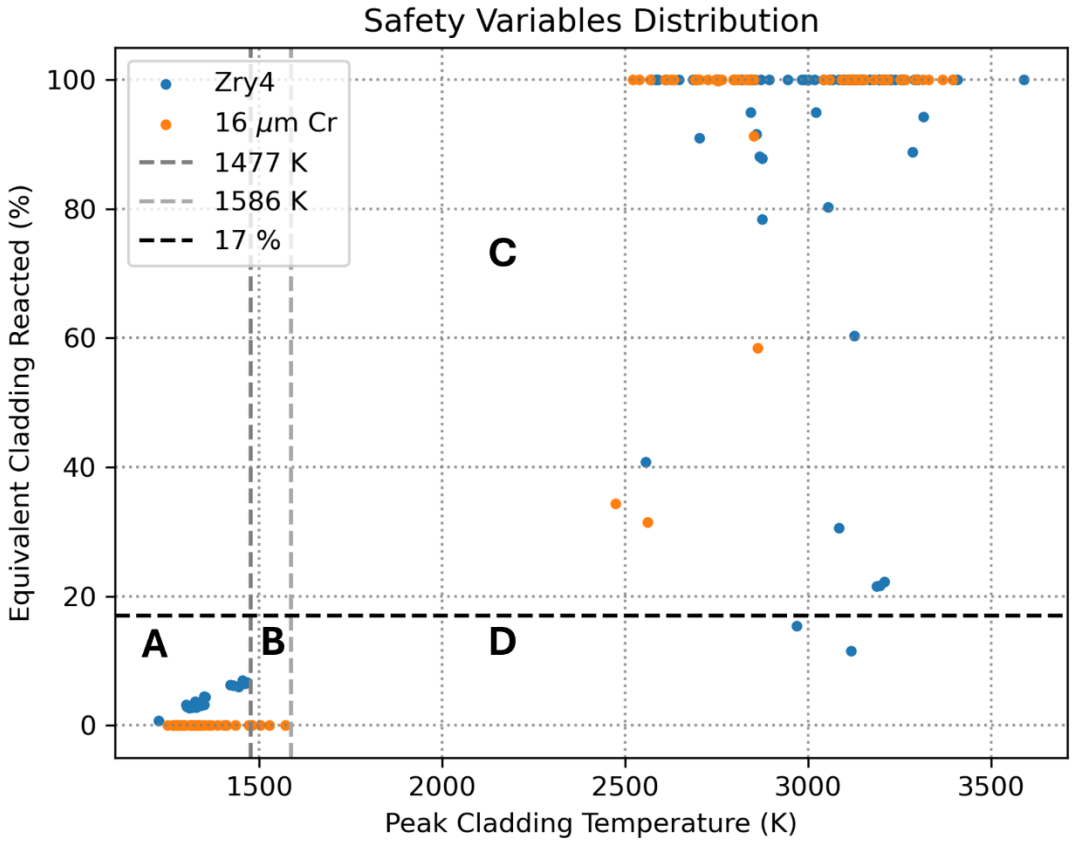


Caso en que el ATF evita la degradación del núcleo





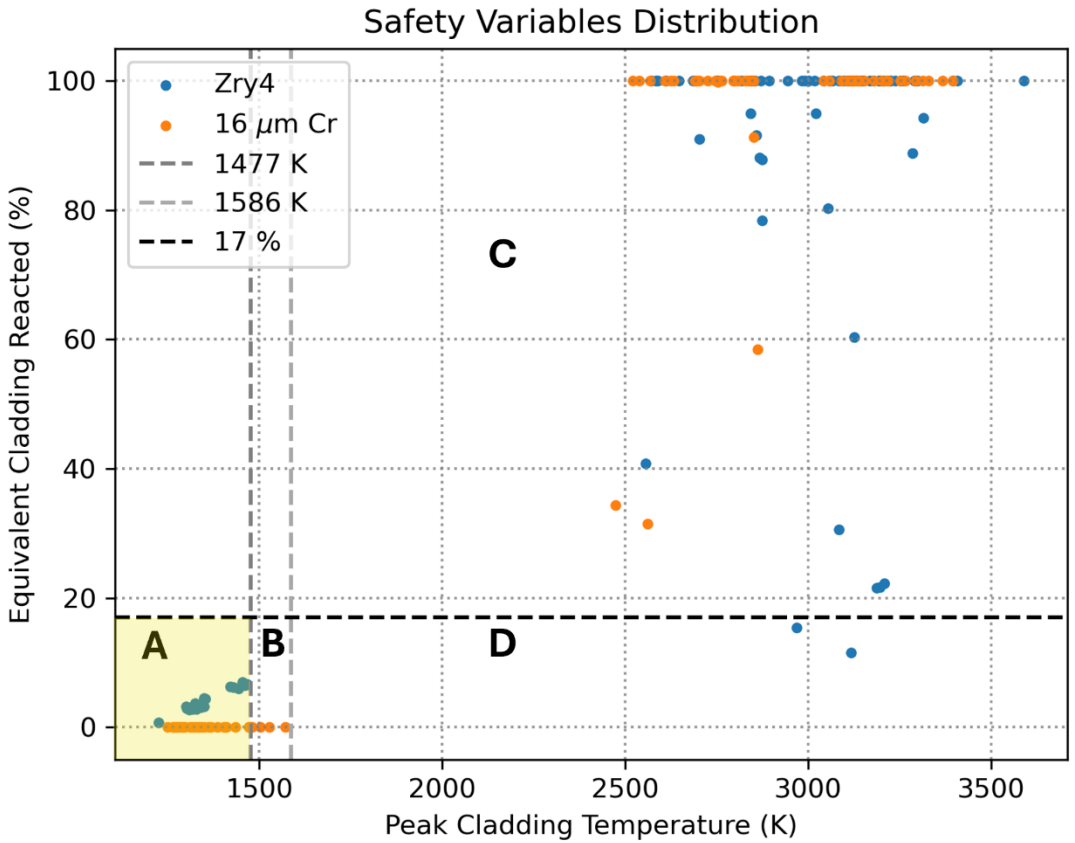
Resultados LBLOCA



	Zry4	ATF ($16\mu m$ Cr)	Proveniente de
Región A			Región A (55)
PCT<1477 K	55	63	Región C (6)
ECR$<17\%$			Región D (2)
Región B			
1477 K$\leq$PCT<1586 K	0	5	Región C (5)
ECR$<17\%$			
Región C			
PCT≥ 1586 K	68	57	Región C (57)
ECR$\geq 17\%$			
Región D			
PCT≥ 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. Zry4

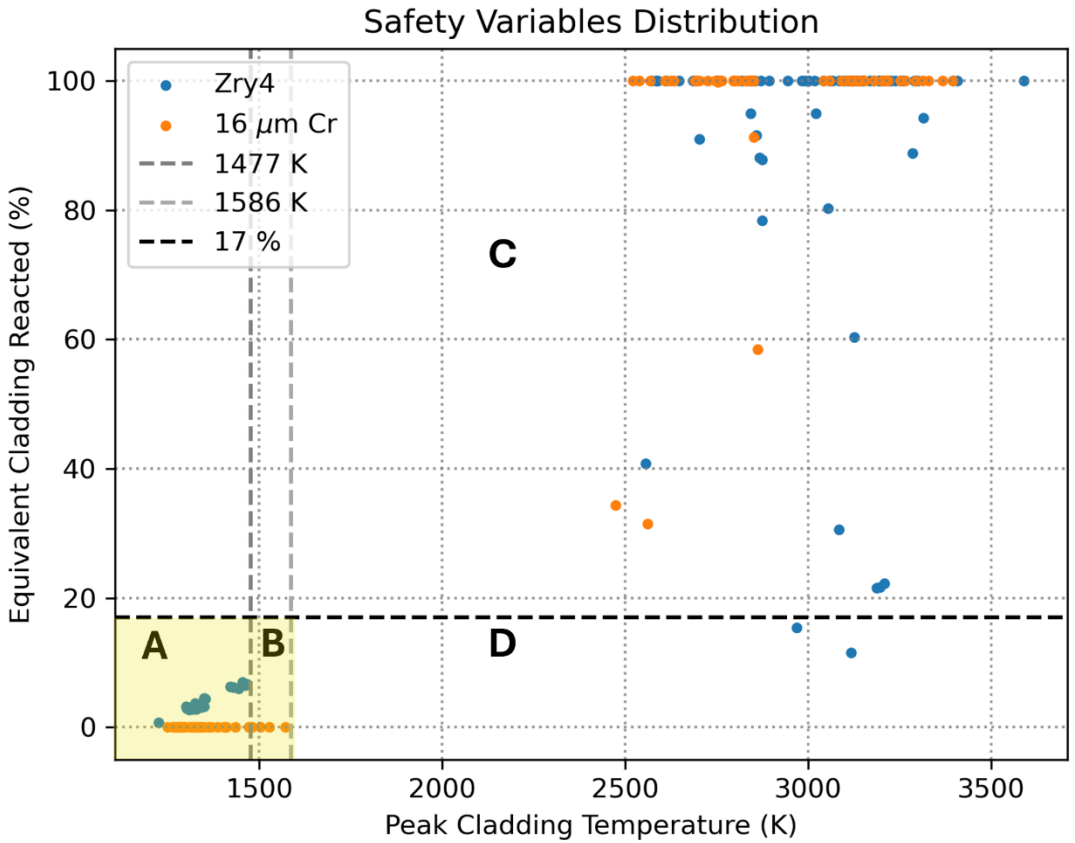
- No hay casos con ECR cercano al límite del 17%
  - A mayor temperatura de vaina, mayor oxidación de Zry4
  - La pérdida de ductilidad de las barras se suele dar por altas temperaturas, y no porque haya una gran proporción de vaina que se oxide



	Zry4	ATF ($16\mu m$ Cr)	Proveniente de
Región A			Región A (55)
PCT< 1477 K	55	63	Región C (6)
ECR< 17 %			Región D (2)
Región B			
1477 K≤PCT< 1586 K	0	5	Región C (5)
ECR< 17 %			
Región C			
PCT≥ 1586 K	68	57	Región C (57)
ECR≥ 17 %			
Región D			
PCT≥ 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

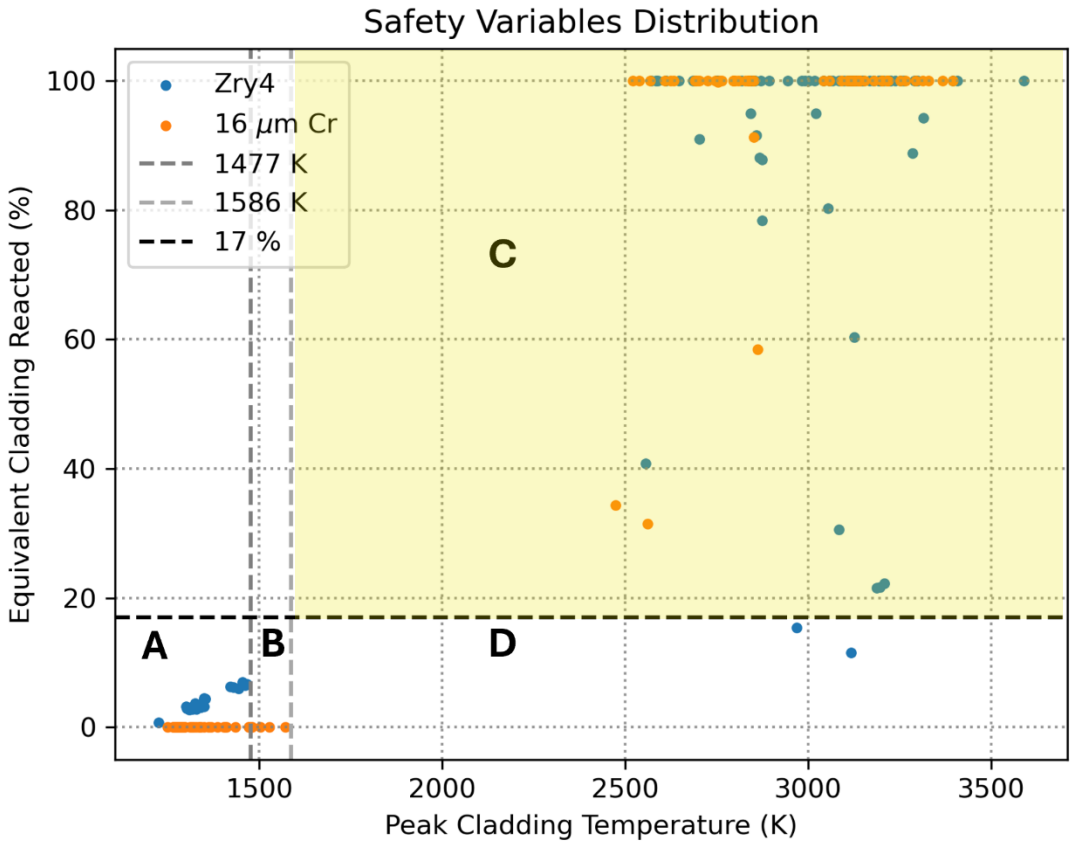
- En las regiones A y B, no hay ningún caso con ECR cercano a 17%



	Zry4	ATF ($16\mu m$ Cr)	Proveniente de
Región A			Región A (55)
PCT< 1477 K	55	63	Región C (6)
ECR< 17 %			Región D (2)
Región B			
1477 K≤PCT< 1586 K	0	5	Región C (5)
ECR< 17 %			
Región C			
PCT≥ 1586 K	68	57	Región C (57)
ECR≥ 17 %			
Región D			
PCT≥ 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

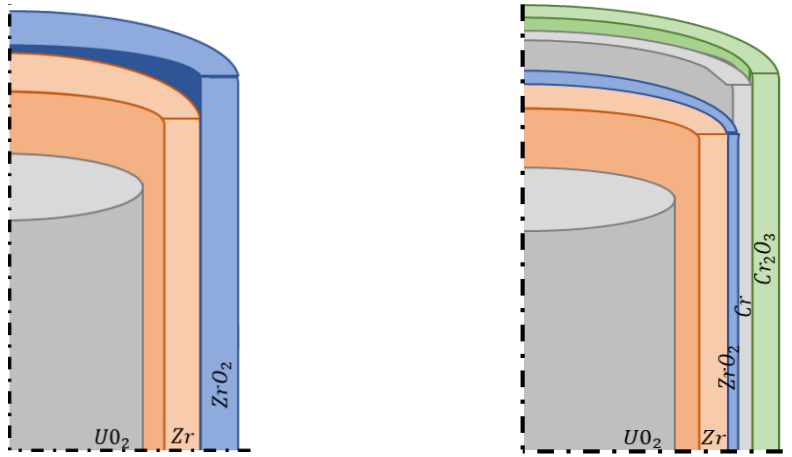


	Zry4	ATF ($16\mu m$ Cr)	Proveniente de
Región A			Región A (55)
PCT< 1477 K	55	63	Región C (6)
ECR< 17 %			Región D (2)
Región B			
1477 K≤PCT< 1586 K	0	5	Región C (5)
ECR< 17 %			
Región C			
PCT≥ 1586 K	68	57	Región C (57)
ECR≥ 17 %			
Región D			
PCT≥ 1586 K	2	0	-
ECR< 17 %			
Casos sin daño en el 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

$\mathrm{ECR}_{\mathrm{Zry4}}$: *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

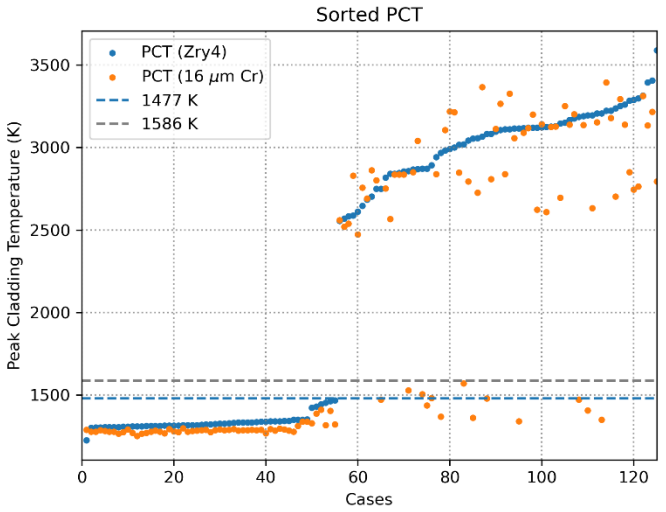
Paso 3 Implementación de un nuevo modelo de oxidación

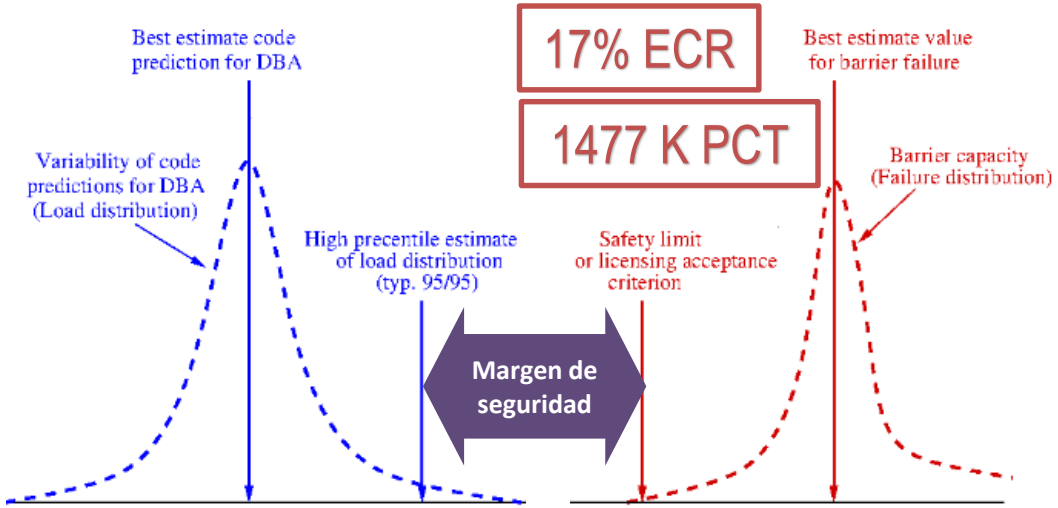
Paso 4 V&V del nuevo modelo

Paso 5 Cuantificación del impacto en los márgenes de seguridad

Conclusiones

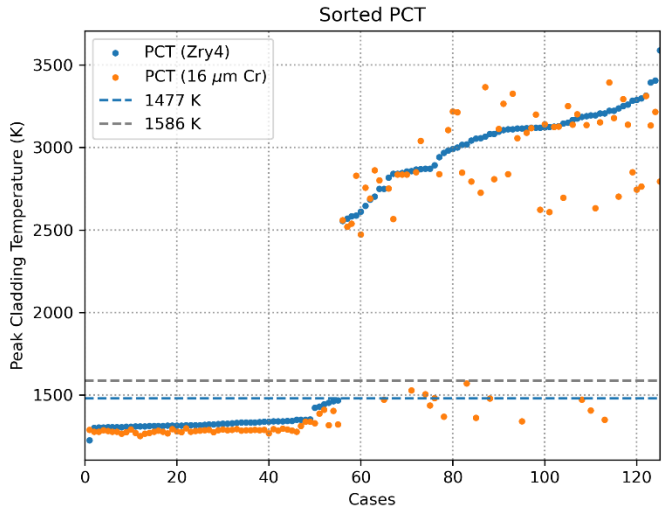
- Evaluación del impacto en los márgenes de seguridad durante secuencias LBLOCA:
  - El límite del ECR para ATF cromado debería redefinirse
  - De las 70/125 secuencias que presentaban daño en el núcleo con Zry4, sólo 13 lo evitarían
  - El ATF cromado incrementa significativamente los márgenes de seguridad 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)



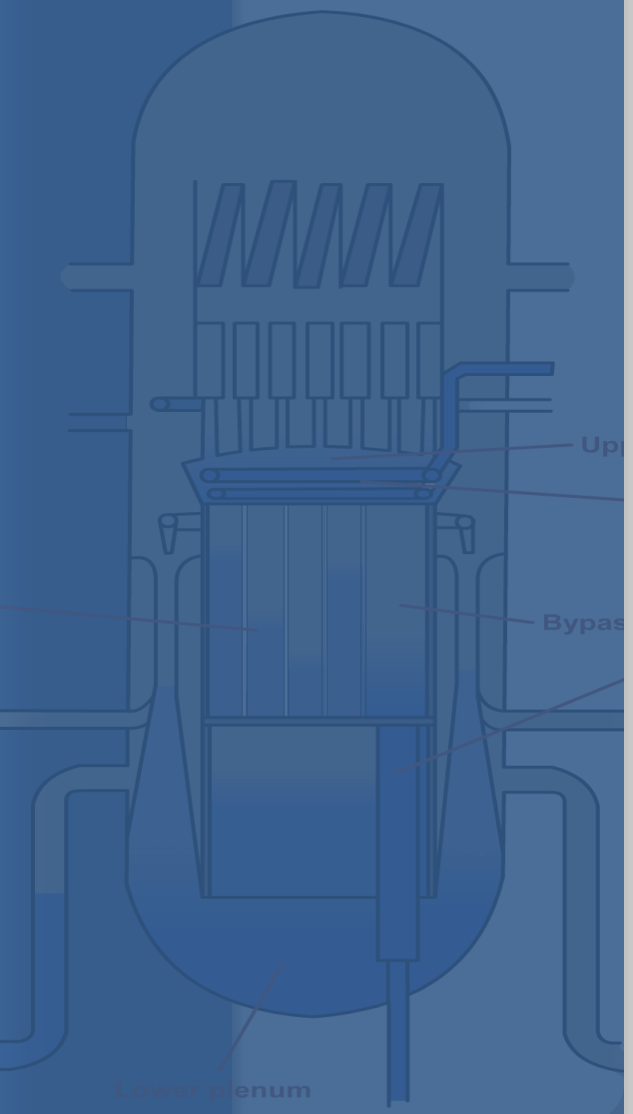


Conclusiones

- 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)







ETSEIB

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

ANT

https://ant.upc.edu

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

Jordi Freixa Terradas jordi.freixa-terradas@upc.edu
Marina Pérez Ferragut marina.perez@upc.edu
Víctor Martínez Quiroga victor.martinez.quiroga@upc.edu
Adrián González Briones adrian.gonzalez.briones@upc.edu
Iván Bravo bravo.ivangabriel@gmail.com

11 de junio de 2026

ANT UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH