

CNE: ESTUDIO PROBABILISTICO DE SEGURIDAD
ACCIDENTES CON PERDIDA DE REFRIGERANTE PRIMARIO
ANALISIS POR SECUENCIAS DE EVENTOS
Silvia Layral
Dpto. Seguridad Nuclear y Licenciamiento
Dirección de Centrales Nucleares
Comisión Nacional de Energía Atómica

El objeto de este estudio es realizar para CNE, una evaluación probabilística de los accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA), con vistas a identificar el riesgo asociado a los mismos y verificar su aceptabilidad con las normas establecidas. Este estudio considera como condición inicial al reactor operando a plena potencia y comprende roturas en el sistema primario que producen la iniciación automática del "Sistema de enfriamiento de emergencia del núcleo" (SEEN).

En esta etapa, la evaluación probabilística está enfocada a la identificación y cuantificación de las principales secuencias de fallas posteriores a un LOCA que conducen a un estado no controlado del reactor, al cual se llega por pérdida de alguna de las siguientes funciones de seguridad: 1) extinción de la producción de energía y 2) remoción del calor residual.

Para seleccionar los eventos iniciantes se analizó la evolución de la planta para distintos tamaños y ubicaciones de roturas en el primario.

Con respecto al corte del reactor en todo el rango de roturas se dispone de los dos sistemas de corte, efectivos e independientes. Las diferencias en la evolución determinan diferencias en los parámetros que inician los sistemas de parada.

Con respecto a la remoción del calor residual, el SEEN suministra el agua necesaria para compensar el inventario descargado a través de la rotura y de acuerdo al tamaño de la rotura, el principal sumidero de calor resulta constituido por: los generadores de vapor; ó por la rotura (con enfriamiento vía el intercambiador de calor del SEEN en la etapa recuperativa) o por una combinación de ambos. Por otro lado, el sistema del moderador a baja presión y frío, proporciona un sumidero de calor alternativo capaz de mantener la integridad del canal combustible en casos de falla de la inyección de enfriamiento de emergencia del núcleo o pérdida de las mencionadas vías de extracción del calor residual, evitando así la fusión del núcleo.

El comportamiento descrito permite clasificar los accidentes con pérdida refrigerante en dos familias, según sea el sumidero de calor principal disponible para la remoción de calor residual:

1) Accidentes con pérdida grande de refrigerante:

Comprende cualquier rotura en el primario en la cual el principal sumidero de calor está constituido por la rotura. La descarga de refrigerante a través de la misma remueve el calor residual en todas las etapas del SEEN. Este grupo incluye roturas desde un tamaño equivalente a un 5% de un colector de entrada (CE) hasta la rotura guillotina de las cañerías de mayor tamaño. Desde el punto de vista de los tiempos de respuesta, duración de las etapas y requerimientos de los sistemas de seguridad involucrados, las roturas doble guillotina (100%) de las cañerías de mayor diámetro (colector de entrada, colector de salida, etc.), resultan en las mayores exi-

gencias. Se elige como evento iniciante representativo del conjunto a una rotura del 100% CE. Si bien existen diferencias entre roturas del 100% con distinta ubicación, las mismas no son significativas y los resultados de la rotura del 100% CE son aplicables a las otras ubicaciones. Conservativamente estos resultados se consideran válidos hasta roturas en el primario de tamaño equivalente a un 5% CE. La frecuencia anual de ocurrencia para un LOCA grande se asume conservativamente en $10^{-3}/a$.

2) Accidentes con pérdida pequeña de refrigerante (LOCApequeño):

Comprende cualquier rotura en el primario en la cual los generadores de vapor (G.V.) constituyen el principal sumidero de calor del circuito roto si funcionan las bombas del primario. En caso de pérdida de la circulación forzada la preponderancia de la rotura o de los G.V. como sumidero de calor depende del tamaño de la rotura. Este grupo incluye roturas desde tamaño equivalente a un 5% CE hasta un 0,3% CE (límite de iniciación automática del SEEN para roturas que descargan refrigerante en la atmósfera de la contención). Se han seleccionado los siguientes dos eventos iniciantes representativos del grupo:

- Rotura del 5% en el colector de entrada del reactor, $\lambda = 10^{-3}/a$
- Rotura del 1,2% en el colector de entrada del reactor, $\lambda = 10^{-2}/a$

Ambos difieren en su frecuencia de ocurrencia (λ) y en la eficacia de los generadores de vapor como sumidero de calor en caso de pérdida de la circulación forzada en el primario. Así, para roturas menores que la equivalente a un 1,2% CE, los G.V. constituyen el principal sumidero de calor con o sin circulación forzada en el primario. Los resultados se consideran aplicables a tamaños equivalentes en otras ubicaciones y conservativamente se consideran válidos para roturas de menor tamaño.

Se describen a continuación para cada evento iniciante seleccionado, las principales secuencias de fallas que a continuación de ocurrido el accidente pueden conducir a la "fusión del núcleo". En todos los casos se asume una etapa recuperativa post-LOCA de 3 meses. En el análisis de las fallas en funcionamiento de los distintos sistemas encargados de la remoción de calor residual se ha asumido conservativamente que la interrupción de la circulación y/o enfriamiento al SEEN llevan al moderador como sumidero de calor y que éste sin refrigeración o/y estancado no es capaz de actuar como sumidero adecuado en caso de falla del SEEN.

Rotura del 100% de un colector de entrada (LOCAgrande)

La primera función de seguridad a considerar en la secuencia de eventos es el corte del reactor. Se dispone para esta rotura, así como para toda la familia que representa (LOCA grande), de dos sistemas de parada N° 1 y N° 2 efectivos e independientes para extinguir el reactor. La probabilidad de que ambos sistemas fallen en cortar el reactor es 10^{-6} , por lo que resulta una "frecuencia anual de fusión de núcleo" debido a falla del corte del reactor de $10^{-9}/a$ (increíble).

La falla de la aislación del circuito roto del sano a continuación de un LOCA grande es increíble ($7,5 \times 10^{-8}/a$).

La falla del SEEN para cumplir su función conduce al moderador como sumidero de calor alternativo que evita la "fusión de núcleo". Las fallas a la demanda de cualquiera de los subsistemas del SEEN excluidos los suministros es 5×10^{-3} . La falla del operador

para establecer la etapa de baja presión se ha estimado dado el tiempo disponible (15 min.) en 10^{-1} . Por lo tanto para una rotura del 100% CE se llega al moderador como sumidero de calor en el corto plazo con una frecuencia de $1 \times 10^{-4}/a$. La probabilidad de falla a la demanda del moderador como sumidero de calor ha sido estimada en 10^{-2} . La secuencia LOCA + SEEN indisponible + falla de la capacidad inicial del moderador para actuar como sumidero de calor, conduce a una frecuencia de fusión de núcleo de $1 \times 10^{-6}/a$.

Dado que en el primer día no se aceptan interrupciones ni en el caudal de circulación ni en el caudal de refrigeración del SEEN o del sistema del moderador, la pérdida del suministro eléctrico a Clase IV y III como consecuencia del corte del reactor lleva a la pérdida del sumidero de calor para el circuito roto constituyendo una causa común de falla entre el SEEN y el moderador. La probabilidad de perder, a continuación de un LOCA, el suministro eléctrico a Clase IV como consecuencia del corte del reactor se estimó en 10^{-2} . La pérdida de dicho suministro demanda la entrada de los grupos diesel. La probabilidad de falla en el restablecimiento de la energía eléctrica a Clase III es 7×10^{-3} , lo que lleva a una probabilidad de fusión de núcleo de $7 \times 10^{-8}/a$ (increíble).

La probabilidad de falla en funcionamiento de la etapa de baja presión ha sido estimada en los 3 meses en 6×10^{-3} (incluye como contribuciones principales la pérdida de las bombas y la falla del intercambiador que conduce a una interrupción del caudal de recirculación). A pesar de que en el largo plazo se aceptan interrupciones en la circulación y/o refrigeración del SEEN que permitirían efectuar reparaciones, conservativamente esta posibilidad no ha sido tenida en cuenta y se ha asumido que la pérdida de estas funciones lleva al moderador como sumidero de calor. La falla del SEEN en el corto o largo plazo lleva al moderador como sumidero de calor con una frecuencia total de $1,1 \times 10^{-4}/a$. Se ha estimado la probabilidad de falla del moderador en 3 meses en $2,3 \times 10^{-2}$, este valor incluye fallas propias y la pérdida de agua de servicio en los 3 meses. La frecuencia de fusión de núcleo debido a fallas del SEEN en el corto o largo plazo combinadas con fallas en funcionamiento del moderador resulta $2,5 \times 10^{-6}/a$.

La probabilidad de falla aleatoria del suministro eléctrico a Clase IV en 3 meses se estimó en 0,1 y la probabilidad de falla en el restablecimiento de energía eléctrica a la Clase III es 7×10^{-3} , con lo que resulta una frecuencia de "fusión de núcleo" debido a pérdida del suministro eléctrico en el largo plazo de $7 \times 10^{-7}/a$.

La falla aleatoria del sistema de agua de servicio de baja presión durante la etapa recuperativa post-LOCA, lleva a la pérdida del agua de enfriamiento al intercambiador del SEEN y a los intercambiadores del moderador. Conservativamente se asume que esta pérdida lleva a la falla del SEEN y del moderador como sumideros de calor y por lo tanto a la fusión del núcleo. La frecuencia de pérdida del sistema de agua de servicio es $5 \times 10^{-2}/a$, con lo que resulta una probabilidad de pérdida total de agua de servicio en 3 meses de $1,3 \times 10^{-2}$ y por lo tanto una frecuencia de fusión de núcleo de $1,3 \times 10^{-5}/a$. En la tabla 1 se presentan las contribuciones a la frecuencia de fusión de núcleo para este tamaño de rotura.

Rotura del 5% de un colector de entrada (LOCApequeño):

Las secuencias de fallas correspondientes a este tamaño de rotura son similares a las de una rotura del 100% CE. Lo mismo ocurre con la confiabilidad de los sistemas involucrados, con excepción de la

contribución del error del operador a la indisponibilidad del SEEN. Dado el tiempo disponible en este caso (50 min.), la probabilidad de falla del operador para establecer la etapa de baja presión del SEEN se estimó en 5×10^{-3} , de lo que resulta para el SEEN una indisponibilidad de 10^{-2} y una probabilidad total de falla de $1,6 \times 10^{-2}$ (demanda más funcionamiento). La probabilidad de falla del moderador a la demanda y en el largo plazo se estimó en 10^{-2} y $2,3 \times 10^{-2}$ respectivamente, lo que lleva para estas secuencias de fallas a una frecuencia de fusión de núcleo de $10^{-7}/a$ para el corto plazo y de $3,7 \times 10^{-7}/a$ en el largo plazo. En la tabla 1 se presentan las contribuciones a la frecuencia de fusión de núcleo para este tamaño de rotura.

Rotura del 1,2% CE de un colector de entrada (LOCApequeño):

Se dispone para este tamaño de rotura de los dos sistemas de parada N° 1 y N° 2 efectivos e independientes para extinguir el reactor. La frecuencia de fusión de núcleo que resulta por este camino es de $10^{-8}/a$ (increíble).

La indisponibilidad del SEEN se estimó en 6×10^{-3} . Este valor incluye la falla a la demanda de cualquier subsistema del SEEN (5×10^{-3}) y la probabilidad de falla del operador para establecer la etapa de baja presión, que dado el tiempo disponible (220 min.) se estimó conservativamente en 10^{-3} . Esta falla, combinada con la falla del moderador (10^{-2}) conduce a una frecuencia de fusión de núcleo en el corto plazo de $6 \times 10^{-7}/a$.

La pérdida del suministro eléctrico en Clase IV y III a continuación del corte del reactor conduce en este caso a una frecuencia de fusión de núcleo en el corto plazo de $7 \times 10^{-7}/a$.

La probabilidad de falla en funcionamiento del SEEN en 3 meses es 6×10^{-3} . La falla del SEEN lleva al moderador como sumidero de calor con una frecuencia total de $1,2 \times 10^{-4}/a$. La probabilidad de falla del moderador en 3 meses es $2,3 \times 10^{-2}$, por lo que la frecuencia resultante para la pérdida del sumidero de calor en el largo plazo es $2,8 \times 10^{-6}/a$.

La probabilidad de perder suministro eléctrico a Clase IV y III en tres meses es 7×10^{-4} , por lo que resulta por este camino una frecuencia de fusión de núcleo de $7 \times 10^{-6}/a$. En la Tabla 1 se presentan las distintas contribuciones a la frecuencia de fusión de núcleo.

Conclusiones

La cuantificación conservativa de las secuencias de eventos que para las distintas categorías de LOCA conducen al escenario de "fusión de núcleo", resulta para cada caso analizado en un valor máximo de "frecuencia anual de fusión de núcleo". Los valores obtenidos se consideran aceptables. Las contribuciones principales se deben a fallas en el largo plazo, en particular de los sistemas de suministro, dado que en el largo plazo se hacen las suposiciones más conservativas.

TABLA 1: CONTRIBUCIONES A LA FRECUENCIA DE FUSION DEL NUCLEO

TAMANO DE ROTURA	FRECUENCIA LOCA (1/a)	CORTO PLAZO (F. DEMANDA)			FRECUENCIA DE "FUSION DE NUCLEO" (1/a) corto plazo	LARGO PLAZO (3 meses)					FRECUENCIA DE "FUSION DE NUCLEO" (1/a) largo plazo	
		PROB. FALLA SEEN/demanda	PROB. FALLA MODERADOR (enfriam. rápido)	PROB. FALLA SUM. ELEC. CLASE IV-III		PROB. TOTAL FALLA SEEN, (demanda + func)	PROB. FALLA MODERADOR (INCLUIDO ENFRIAMIENTO)	PROB. FALLA ALIMENTORIA SUM. ELECT. CLASE IV-III	PERDIDA TOTAL SUM. AGUA DE SERVICIO			
100-5% CE	10^{-3}	10^{-1}	10^{-2}	-	1×10^{-6}	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	-	-	-	-	$2,5 \times 10^{-6}$
5 - 1,2% CE	10^{-3}	-	-	7×10^{-5}	7×10^{-8} (increíble)	-	-	7×10^{-4}	-	-	-	7×10^{-7}
1,2-0,3% CE	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	7×10^{-5}	10^{-7}	$1,6 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	-	7×10^{-4}	-	$1,3 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-7}$
		-	-	7×10^{-5}	7×10^{-8} (increíble)	-	-	-	-	-	-	7×10^{-7}
		6×10^{-3}	10^{-2}	-	6×10^{-7}	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	-	-	-	-	$2,8 \times 10^{-6}$
		-	-	7×10^{-5}	7×10^{-7}	-	-	7×10^{-4}	-	-	-	7×10^{-6}

$f_{\text{fusión núcleo}} = 1,4 \times 10^{-5}/a$ (roturas 5-1,2% CE)
 $f_{\text{fusión núcleo}} = 1,1 \times 10^{-5}/a$ (roturas 1,2-0,3 % CE)

LOCA grande { $f_{\text{fusión núcleo}} = 1,7 \times 10^{-5}/a$ (roturas 100-5% CE) LOCA pequeño