

El APS a baja potencia y en parada, marco para la mejora de la seguridad

V. Nos

Históricamente los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS) han estado enfocados exclusivamente en condiciones en operación a plena potencia de planta, sin embargo, la experiencia operativa ha ido revelando que los sucesos acontecidos en operación a baja potencia y en parada pueden presentar también amenazas para la seguridad de la planta. Aunque las evaluaciones cualitativas (NUMARC 91-06) de la configuración en Parada han sido internacionalmente aceptadas, se ha demostrado los beneficios del APS en operación a baja potencia y parada como marco cuantitativo fundamental del entendimiento del riesgo en dichos estados operativos y como herramienta para la mejora de la seguridad de la planta y de la gestión del riesgo.

Historically Probabilistic Safety Analysis (PSA) has been focused exclusively at full power operation, nevertheless, operational experience has revealed that events occurred during low power and shutdown can also present threats for the safety of the plant.

Though qualitative assessments (NUMARC 91-06) about the configuration in shutdown have been internationally accepted, the benefits of Low Power & Shutdown PSA have been demonstrated as fundamental framework of quantitative understanding for improving safety and risk management in the above mentioned operative conditions of the plant.



VICENTE NOS LLORENS

es licenciado en Ciencias Químicas (especialidad en Química Industrial) por la Universidad de Valencia, diplomado en Ingeniería Nuclear por la Junta de Energía Nuclear y M.B.A. por el Instituto de la Empresa. Comenzó su carrera profesional, en el campo nuclear, en 1981 en Empresarios Agrupados, incorporándose en 2004 a Westinghouse como responsable del APS. Lleva más de 30 años trabajando en el área del APS, fundamentalmente en plantas PWR de diseño Westinghouse y, en concreto, desde 1988 para las plantas de ANAV.

INTRODUCCIÓN

Los primeros APS en operación a baja potencia y en parada (comúnmente denominado APS en Otros Modos, APSOM) (*Low Power & Shutdown PRA, LPSP PRA*) se iniciaron, en los años 80, en EE UU, con estudios parciales (NSAC-84, NSAC-52, NSAC-156, WCAP-11916, ...), prosiguiéndose (ya en los años 90) con programas piloto para BWR y PWR, otros estudios parciales (NSAC-183, NUREG/CR-5822, WCAP-12476, ...), cristalizándose en un estudio completo (NUREG/CR-6144) ya conteniendo todos aquellos escenarios que presentan un riesgo predominante en parada, según la evaluación realizada posteriormente por la NRC (NUREG-1449). En paralelo, en Europa, el OIEA emite una guía técnica (IAEA-TECDOC-1144) y Francia comienza el desarrollo del APSOM (EPS 1300 EDF/EPS900 EA) ya adoptándose medidas para reducción del riesgo (mitigación del denominado "escenario francés").

En España, el primer desarrollo conocido (bajo requisito del CSN, octubre de 1990) correspondió a la CN

Vandellós II (año 1993) aunque se editó con un alcance limitado, motivado por el estado del arte del momento, centrándose únicamente en los dos escenarios que se consideraron con mayor atención: "Pérdidas de RHR en operación a media tobera" y "LOCA en modos 4 y 5 con salvaguardias disminuidas". Posteriormente, en 1994, a la sazón la Asociación Nuclear de Ascó (ANA), decide afrontar un desarrollo más amplio, postulándose como planta piloto para establecer la metodología (en consenso con el CSN) para las centrales PWR, editándose la primera edición del APSOM (ya con incorporación de los comentarios del CSN en dicho proceso) en abril-97.

Establecidas dichas bases, el APSOM es requisito para dar cumplimiento a la segunda edición del "Programa Integrado de realización y utilización de los APS en España", donde se establece de forma explícita "La realización de APS para los modos de operación distintos de la plena potencia es algo necesario, factible y muy importante para completar en general los análisis de la seguridad de las centrales nucleares".

ESTADO ACTUAL Y MARCO REGULADOR

Mientras el APSOM se ha comenzado a desarrollar y utilizar ampliamente en Europa, en EE UU existe aún cierta disparidad, en parte, por no disponer aún del estándar y, en parte, por ciertas limitaciones de la tecnología (HRA, incendios).

No obstante, y a la espera de consenso sobre el estándar en EE UU, el incremento de exigencias necesarias para soportar las aplicaciones basadas en el riesgo que requieren aprobación de la NRC y, en especial, para responder a desfavorables hallazgos reguladores resultantes del *Significance Determination Process* (SDP), ha llevado a los titulares de las plantas a un incremento de desarrollos. Ha contribuido también a ello el disponer de un borrador del estándar, elaborado por la *American Nuclear Society* (ANS) básicamente completo (excepto para incendios), que sigue, en gran medida, el estándar de ASME como patrón metodológico de partida y como control del nivel de calidad. La última versión del mismo (LPSP PRA Standard - ANS/ASME-58.22) está en fase

EOP	Modo	ESTADO OPERACIONAL PLANTA	% Tiempo CN Ascó 1	% Tiempo CN Ascó 2	% Tiempo CN Vandellós II
		Operación a potencia	89,11	90,57	84,55
1	1 y 2	Operación a baja potencia y parada del reactor	0,19	0,37	0,60
2	3	Enfriamiento con GV (hasta 177°C)	0,68	0,46	1,37
3	4	Enfriamiento con RHR (hasta 93°C)	0,28	0,31	0,28
4	5	Enfriamiento con RHR (hasta 60°C)	1,48	0,87	1,52
5	5	Drenaje del SRR hasta nivel de brida (combustible gastado)	0,10	0,12	0,13
6	5 y 6	Operación a nivel de brida (combustible gastado)	0,47	0,46	0,57
7	6	Llenado cavidad de recarga	0,42	0,30	0,11
8(a)(c)	6	Recarga	1,31	1,17	1,40
8(b)	----	Recarga (sin combustible en vasija)	2,96	2,45	5,78
9	6	Vaciado cavidd de recarga y drenaje del SRR hasta nivel de brida (combustible nuevo)	0,23	0,28	0,17
10	6 y 5	Operación a nivel de brida (combustible nuevo)	0,52	0,44	0,56
11	5	Drenaje hasta media tobera	0,10	0,15	0,04
12	5	Operación a media tobera	0,19	0,15	0,19
13	5	Rellenado completo del SRR	0,19	0,22	0,56
14	5	Calentamiento del SRR (hasta 93°C)	0,53	0,45	0,88
15	4	Calentamiento del SRR con BRR (hasta 177°C)	0,17	0,21	0,27
16	3	Control de calentamiento con GV	0,53	0,52	0,49
17	2 y 1	Arranque reactor y operación a baja potencia	0,56	0,51	0,51

Tabla 1. Estados Operacionales de Planta (EOP) y permanencia histórica en plantas de ANAV.

avanzada de aprobación final, antes de su edición como programa piloto. Está prevista su emisión en el primer trimestre de 2014, con un período de dos años (salvo extensión) para pruebas. Será incorporado posteriormente, tras aprobación de ANS/ASME y NRC, como apéndice al ASME/ANS RA-S y ASME/ANS-58.24. También es remarkable que este tipo de APS es requisito para la certificación de los diseños de los reactores de nueva generación y en el caso del AP-1000 de Westinghouse ya ha sido aprobado.

En España, el APSOM resulta necesario para apoyar las aplicaciones basadas en el riesgo y para la valoración y respuesta al Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC). Adicionalmente, tras los trabajos realizados por Wenra, con objeto de armonizar la reglamentación de los diferentes países miembros, el CSN emitió en junio de 2010 la Instrucción de Seguridad IS-25 sobre *Criterios y requisitos sobre la realización de los análisis probabilistas de seguridad y sus aplicaciones a las centrales nucleares*, recogiendo de forma explícita la extensión del alcance para abordar otro tipo de sucesos que hasta ahora habían suscitado menos atención (APSOM de Nivel 2 de sucesos internos y APSOM de Nivel 1 y 2 de incendios e inundaciones).

ALCANCE Y METODOLOGIA

Westinghouse Electric Company LLC acumula una dilatada experiencia y

capacidad contrastada tanto en España (plantas de la Asociación Nuclear Ascó-Vandellós, ANAV) como internacional (EE UU y Europa) en el desarrollo del APSOM para satisfacer las necesidades de las plantas, los requisitos de los organismos reguladores y las expectativas de la industria nuclear. Actualmente es miembro activo de diferentes comités de la ANS involucrados en el desarrollo e implementación del *LPSD PRA Standard* y pilota todos los programas del PWROG.

Como objetivos básicos siempre se contemplan:

- Identificación de los tipos más probables de secuencias de sucesos que podrían llevar a una situación de daño al núcleo del reactor y estimación de la frecuencia de daño al núcleo (FDN).
- Detección de los aspectos más débiles de la seguridad ("vulnerabilidades") y que contribuyan más a la probabilidad de ocurrencia de accidentes con daño al núcleo.
- Reforzar, mediante cambios de diseño, procedimientos, prácticas operativas o programaciones de Recarga los aspectos identificados como contribuyentes significativos a la probabilidad de ocurrencia de accidentes con daño al núcleo, cuando sea necesario o aconsejable desde un punto de vista coste-beneficio.
- Disponer de un modelo de la central y de unas técnicas analíticas susceptibles de ser utilizadas para

la realización de aplicaciones y como apoyo en la toma de decisiones sobre aspectos de operación o requisitos de licenciamiento.

La metodología general utilizada se basa en el borrador del estándar de la ANS, contempla las líneas generales recomendadas por el OIEA, cumple con el programa de evaluación de riesgo en parada para reactores PWR (NUREG/CR-6144) y contiene todos aquellos escenarios que presentan un riesgo predominante, en parada, según la evaluación realizada por la NRC (NUREG-1449).

En cualquier caso, resulta patente que el alcance y metodología de los APSOM varía entre países y entre plantas y, como consecuencia, también la adaptación que realiza Westinghouse para alcanzar los objetivos perseguidos y su uso para la gestión del riesgo.

En general, el alcance del APSOM abarca todos los Estados Operacionales de Planta (EOP) que se puedan definir para condiciones de planta a potencia inferior al 1-2%. Dicho límite se solapa con la frontera analizada para el APS a Potencia en donde se consideran los Modos 1 y 2 de operación. Por tanto, normalmente, el alcance del APSOM se debe centrar en los Modos 3, 4, 5 y 6.

Aspecto clave es la definición de escenarios (combinación de grupos de sucesos iniciadores en EOP) a analizar. Para ello, es básico la definición y caracterización de los EOP que se

van a considerar. En la Tabla 1 se ofrece una lista de EOP típica para plantas PWR de diseño Westinghouse. También, para representar el estado concreto de cada EOP, se deben precisar las configuraciones de la planta, tanto externas (p. ej. transformadores exteriores disponibles y conectados a barras de salvaguardia) como internas, para indicar los sistemas o trenes que se encuentran disponibles (o con capacidad de recuperación) en el momento del accidente. Los modelos de árboles de fallo y sucesos deben permitir la asignación de diferentes configuraciones para realizar la cuantificación.

En definitiva, el alcance definitivo de escenarios a contemplar debe valorarse en función de los objetivos perseguidos por cada planta, un alcance más amplio de escenarios permite disminuir la incertidumbre asociada a la FDN al ofrecer resultados más realistas y, por tanto, aplicaciones y recomendaciones más sustentadas. Por el contrario, si el modelo únicamente trata de dar respuesta a requisitos reguladores (hallazgos), el alcance puede limitarse.

En cualquier caso, resulta aconsejable, caso de optar por un elevado alcance, disponer de la suficiente versatilidad para su potencial reducción (p. ej. factibilidad de agrupación de escenarios simétricos subiendo y bajando potencia), a efectos de mayor manejabilidad, en especial, para afrontar los nuevos alcances demandados por la IS-25. A título informativo, actualmente, el APSOM de la CN Ascó contempla 29 escenarios y en el APSOM de la CN Vandellós II se han postulado 47 escenarios, contemplándose la diferenciación entre estados operacionales simétricos, subiendo y bajando potencia (Modo 4, Modo 5, nivel de brida con combustible gastado y combustible nuevo y media tobera), a fin de posibilitar un desarrollo muy completo del APSOM.

RESULTADOS Y MEJORAS IMPLANTADAS EN LAS PLANTAS DE ANAV

En las Figuras 1 y 2 se presentan los resultados alcanzados en la CN Ascó, en cuanto al riesgo total (FDN) y riesgo puntual (FDN/tiempo permanencia) por bloques significativos de EOP.

Aunque los resultados pueden estimarse conservadores, queda patente que, aunque el periodo de permanencia de las plantas en Modos 3, 4, 5 y 6 es notablemente inferior (alrededor del 11 % del tiempo anual, como media, en plantas de ANAV) a las condiciones de operación a potencia,

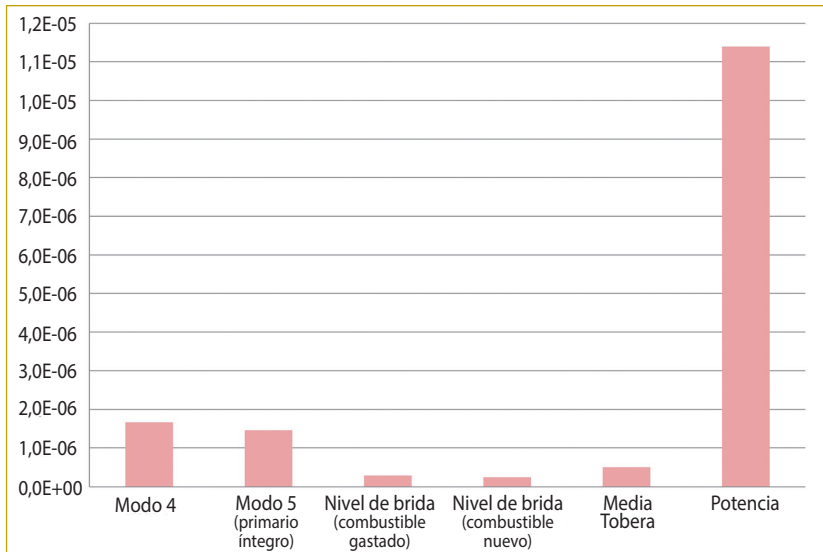


Figura 1. Riesgo total (FDN).

el riesgo puntual de daño al núcleo es superior, poniéndose de manifiesto la importancia de la operación a baja potencia y en parada desde el punto de vista de riesgo.

En cualquier caso, en las plantas de ANAV, la FDN obtenida en sus APSOM ha ido decreciendo en el tiempo, habiéndose observado un efecto positivo del seguimiento del NUMARC 91-06 (PA-126 *Funciones Clave de Seguridad en Parada*), de los ajustes más realistas de los modelos (cálculos termohidráulicos) y, en especial, de las mejoras implantadas como consecuencia de las recomendaciones que se han ido generando desde el APS.

Destacar, asimismo, que han habido cambios en las programaciones de recarga, no derivados estrictamente del APSOM, que han contribuido a mejorar los resultados, entre ellos se

contabiliza el no finalizar el drenaje del primario, bajando potencia (con combustible gastado), a nivel de plano medio de toberas (PMT). Actualmente se llega a nivel de brida. La llegada a PMT (y su operación posterior) era requerida para la instalación de las *nozzle-dams* en los generadores de vapor (GV) para posteriores trabajos e inspección en los mismos. Así, se ha reducido el riesgo, al evitarse posibles roturas o fugas a través de las *nozzle-dams*, disminuirse la posibilidad de cavitación de las bombas de RHR y disponer de mayor tiempo hasta alcanzarse la ebullición (tras pérdida de RHR). También, la no apertura de la boca de hombre del presionador, cuando se inicia el drenaje del primario y se opera a nivel de brida (caso de CN Ascó), ha contribuido a mejorar los resultados ya que, caso del fallo

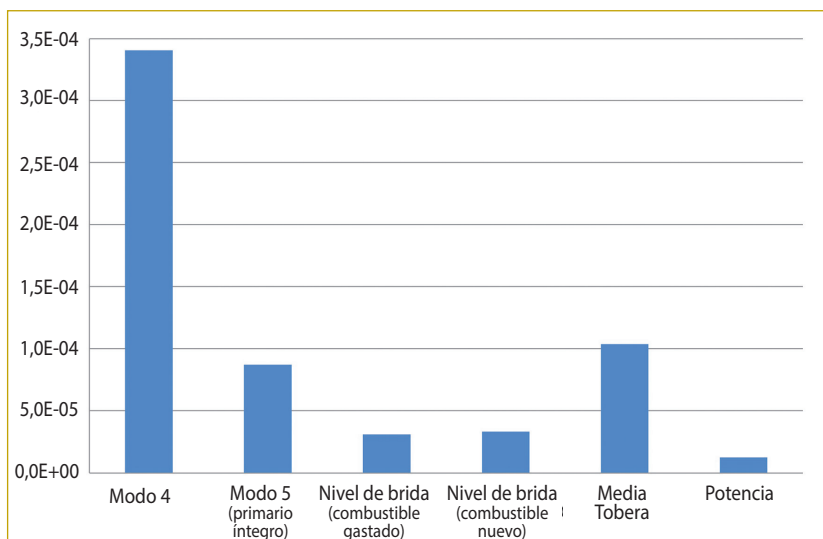


Figura 2. Riesgo puntual.

del RHR, la evacuación de calor podrá garantizarse, recuperándose la integridad del primario, a través del secundario mediante circulación natural, con el inventario inicial existente (y reposición posterior) en los GV.

En general no se ha percibido la necesidad de realizar significativos cambios de diseño aunque se ha detectado alguna asimetría.

Se han proporcionado recomendaciones para:

Programación de recargas y estrategias operativas

- CN Vandellós II presenta una marcada peculiaridad, frente a otras plantas, en relación a su suministro eléctrico (red externa) y los descargos y cambios de sus trafos (denominados TAU, TAR y TAE), no pudiéndose establecer una configuración completamente estándar, al ser una práctica operativa condicionada a los requisitos de planificación de cada recarga. Aunque, desde un punto de vista riguroso del riesgo, siempre sería recomendable realizar todos los cambios de trafos en el EOP-8, se extendería, innecesariamente, la duración de las recargas, con el consiguiente perjuicio económico. Por ello, se deberían ejecutar dos cambios de trafos (sin contabilizar los posibles cambios durante el EOP-8) en Modo 5 (con primario íntegro) bajando (EOP-4) y subiendo potencia (EOP-14). A su vez, se insta a evitar la configuración TAU-TAR simultánea (sólo en EOP-8) y no realizar ningún cambio de trafos con inventario reducido (a nivel de brida).
- Salida de recarga (tras la carga combustible) con ambos generadores diesel disponibles (ya mantenidos).
- Desenergizar (cerradas) las válvulas de aspiración del sumidero de bombas del RHR al transitar a Modo 5 (aplicable a CN Ascó).
- Cambios en el momento de ejecución de pruebas o mantenimientos preventivos (incluso calibraciones de instrumentos).

Disponibilidades de equipos (más allá de ETF)

- Mantener los GV operativos en todos los EOP (excepto en EOP-8), siendo especialmente significativo en los escenarios en operación a nivel de brida (bajando y subiendo potencia) y de media tobera.
- Mantener las motobombas de Agua de Alimentación Auxiliar disponibles en Modo 4 y Modo 5 (incluso con nivel de inventario reducido) para reposición de inventario de los

GV siempre que exista integridad o capacidad de cierre del circuito primario para su represurización.

Mejoras en procedimientos

- Generación de procedimientos específicos para LOCA en Modo 5 y pérdidas de RHR operando a media tobera.
- Mejoras en procedimientos de pérdidas de RHR (con primario íntegro, con inventario reducido a nivel de brida o media tobera) y de SBO.

Mejoras en entrenamientos

- Entrenamiento anual en simulador, aunque aún existen importantes limitaciones en los simuladores *full-scope* en el ajuste de escenarios en operación a nivel de brida, PMT, ...
- Entrenamiento de acciones humanas locales (reposición del TAAR - vía ácido bórico, cierre de los caminos abiertos en operación a nivel de brida, inserción local interruptor y arranque de bomba de carga en reserva) (aplicable a CN Ascó).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es patente que el riesgo asociado en operación a potencia ha ido decreciendo en el tiempo como consecuencia de la implantación de la Regla de Mantenimiento, de mejoras de diseño, prácticas operativas, procedimientos y entrenamientos y, en general, en programas de gestión del riesgo. Esta progresiva mejora de la seguridad de la planta debe mantenerse en operación a baja potencia y en parada, hasta ahora, con menor atención.

Aunque es difícil ofrecer un valor de FDN *best-estimate* en el APSOM, al ser muy dependiente de la programación de recarga, de la disponibilidad de las salvaguardias (la parada no es completamente estándar), del alcance final de escenarios (con práctica imposibilidad de evaluar todos los posibles) y utilización de envolventes conservadoras, se ha demostrado los beneficios del APSOM como marco fundamental del entendimiento del riesgo en dichos estados operativos y su FDN, como herramienta útil de referencia relativa, en la mejora de la seguridad y de la gestión del riesgo, posibilitando proporcionar significativas recomendaciones, no detectadas en los tradicionales análisis de seguridad, para las programaciones de recarga, estrategias operativas y mejoras de procedimientos y entrenamientos.

Además, dicho marco garantiza el disponer de un potente modelo de

planta, con técnicas analíticas susceptibles de ser utilizadas para justificar cambios operativos, realización de aplicaciones y como herramienta de apoyo en la toma de decisiones en aspectos de operación o para responder a requisitos reguladores de licenciamiento. Estos beneficios pueden obtenerse en varias áreas:

- Gestión del riesgo en la programación de descargos y actividades de mantenimiento.
- Apoyo en la toma de decisiones sobre aspectos de operación.
- Desarrollo previo de la programación de recarga para obtener un buen balance: tiempo de duración vs perfil de riesgo aceptable.
- Evaluar estrategias para abordar problemas emergentes.
- Valoración y desarrollo de estrategias para dar respuesta adecuada y necesaria al Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC).
- Proporcionar información a la Regla de Mantenimiento.
- Apoyar y/o complementar programas o aplicaciones basadas en el riesgo (RI-ISI, categorización de válvulas de retención, neumáticas y motorizadas, ...).
- Refinar las funciones clave de seguridad en parada (PA-126).
- Apoyo a evaluación de mantenimiento *online*.

Para consolidar dichos beneficios, es recomendable seguir completando el alcance de escenarios, mejorando su detalle (recopilación de experiencia propia, ajuste continuo y progresivo de códigos termohidráulicos soporte - RELAP/MAAP, modelación de todas las posibles combinaciones de equipos, configuraciones eléctricas, análisis de recuperación de equipos - especialmente subiendo potencia - para posibilitar alineaciones de sistemas o trenes para mitigar las consecuencias) para reducir la incertidumbre en los resultados y, por tanto, ofrecer recomendaciones más sustentadas y elevar la confianza en sus aplicaciones y proporcionar mejor respuesta al SISC (categorización de hallazgos).

En cualquier caso, Westinghouse recomienda un alcance de escenarios práctico y razonable según las pretensiones de utilización en la planta nuclear. Destacar, por tanto, la conveniencia de que ofrezca la mayor versatilidad posible (potencial agrupación de escenarios) para tener en cuenta los próximos desarrollos por requisitos de la IS-25 (p. ej. APSOM de Nivel 1 y Nivel 2 de Incendios e Inundaciones).

Es posible que se requiera una confrontación de los escenarios y refina-

miento de los modelos tras la publicación del estándar.

Por último, por todo lo expuesto actualmente, los resultados (en relación a la FDN) del APSOM pueden interpretarse en general como conservadores, es por ello, que se debe poner especial énfasis y cuidado en la comparación con otros riesgos y su utilización en aplicaciones. La adición a la FDN del APS en operación a potencia, para obtener una FDN total anual de la planta, debe cuestionarse.

AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento a la Asociación Nuclear de Ascó-Vandellós (ANAV) por la colaboración prestada para la publicación de resultados.

REFERENCIAS

- [1]. ODE-84.03 "Programa Integrado de realización y utilización de los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS) en España", segunda Edición, 1998
- [2]. Instrucción IS-25 del CSN "Criterios y Requisitos sobre la realización de los Análisis Probabilistas de Seguridad y sus Aplicaciones a las Centrales Nucleares", 9 de Junio de 2010
- [3]. IAEA-TECDOC-1144 "Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants for Low Power and Shutdown Modes", March 2.000
- [4]. NUREG/CR-6144 "Evaluation of potential Severe Accidents during Low Power and Shutdown operations at Surry", June 1994.
- [5]. NUREG/CR-1449 "Shutdown and Low Power Operations at Commercial NPP in US", 1993.
- [6]. ANS/ASME-58.22 "Low Power and Shutdown PRA Methodology"
- [7]. NUMARC 91-06 "Guidelines for Industry Actions to Assess Shutdown Management", December 1991.
- [8]. AP-1000 DESIGN CONTROL DOCUMENT, chapter 19, PRA, Revision 11 (certified January 2001)
- [9]. U.S. EPR FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT, Revision 3, chapter 19, 2011.
- [10]. ASME/ANS RA-S "Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications"
- [11]. ANS/ASME-58.24 "Severe Accident Progression and Radiological Release (Level 2) PRA Methodology to Support Nuclear Installation Applications"
- [12]. PWROG, International Technical Workshop "Risk-Informed Technical Specifications and Seismic and Low Power Shutdown PRAs", Paris, May 5-6, 2010.■