MÓDULO 6: EVALUACIÓN DE ACCIDENTES

6.1 PROGRESIÓN DE ACCIDENTE DE REACTOR Y MITIGACIÓN

CONTENIDOS

- Origen y evolución de accidentes severos: LOCAs y RiAs
- Medidas de mitigación de accidentes
- Métodos para detectar:
  - Fallos en FCS
  - Degradación del núcleo
  - Fugas en Edificio de Contención (Rx)

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES

Los accidentes en un reactor nuclear se producen como consecuencia de desequilibrios entre la potencia nuclear generada y la capacidad de refrigeración.

Según el origen, se dividen en dos categorías:

- Accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA)
- Accidentes por inserción de reactividad (RIA)

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs

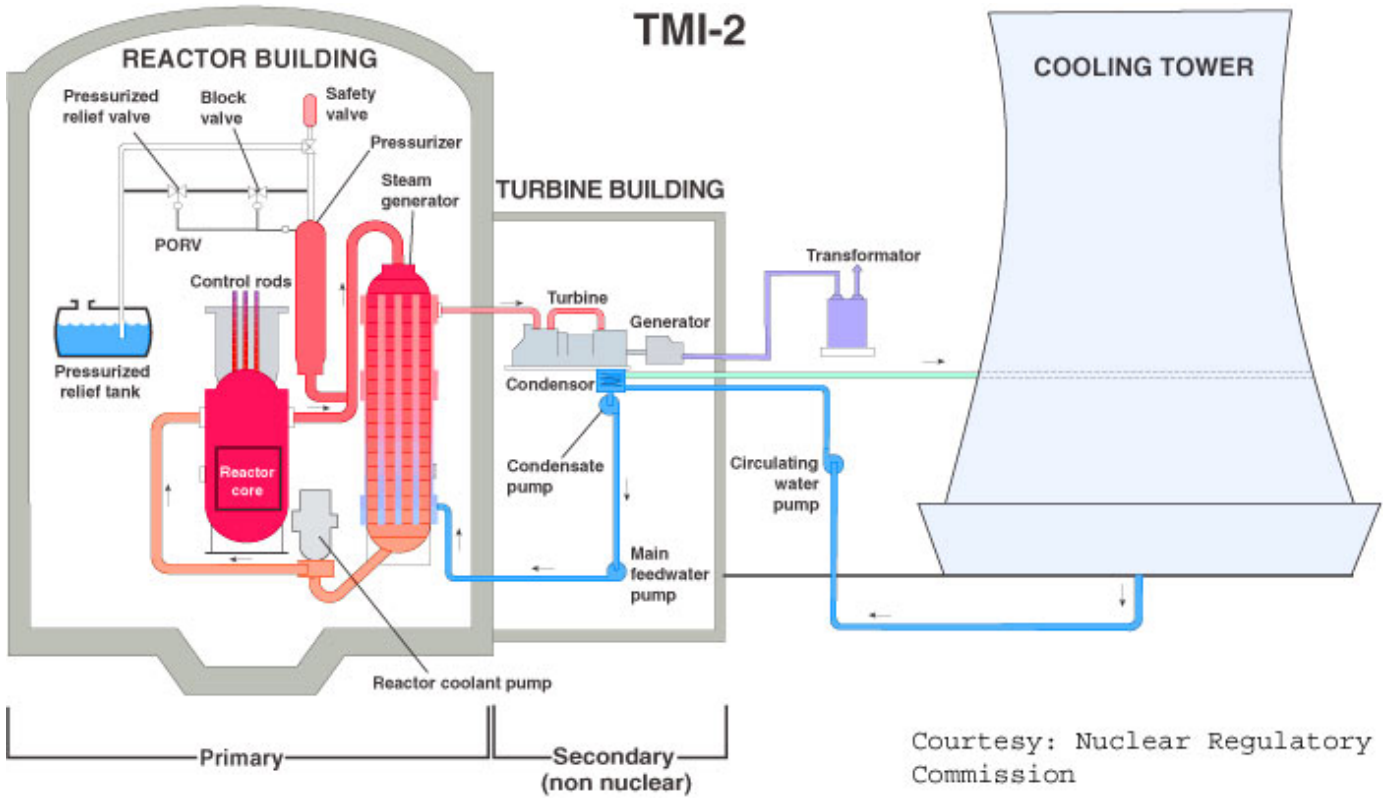
- Descompensación o pérdida total de la capacidad de refrigeración que produce un aumento de la temperatura del combustible.
- Si el fallo de refrigeración perdura durante tiempo suficiente, se puede producir la fusión (parcial o total) del núcleo.
- Causas más comunes:
  - Apertura de válvulas de alivio o de seguridad del RCS
  - Roturas en tuberías del RCS o Sistemas auxiliares
  - Sobrecalentamiento local del combustible por falta de refrigeración debido a impurezas

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs

TMI-2 (USA, 1979; Reactor PWR 930 Mwe, 2 lazos B&W)

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs

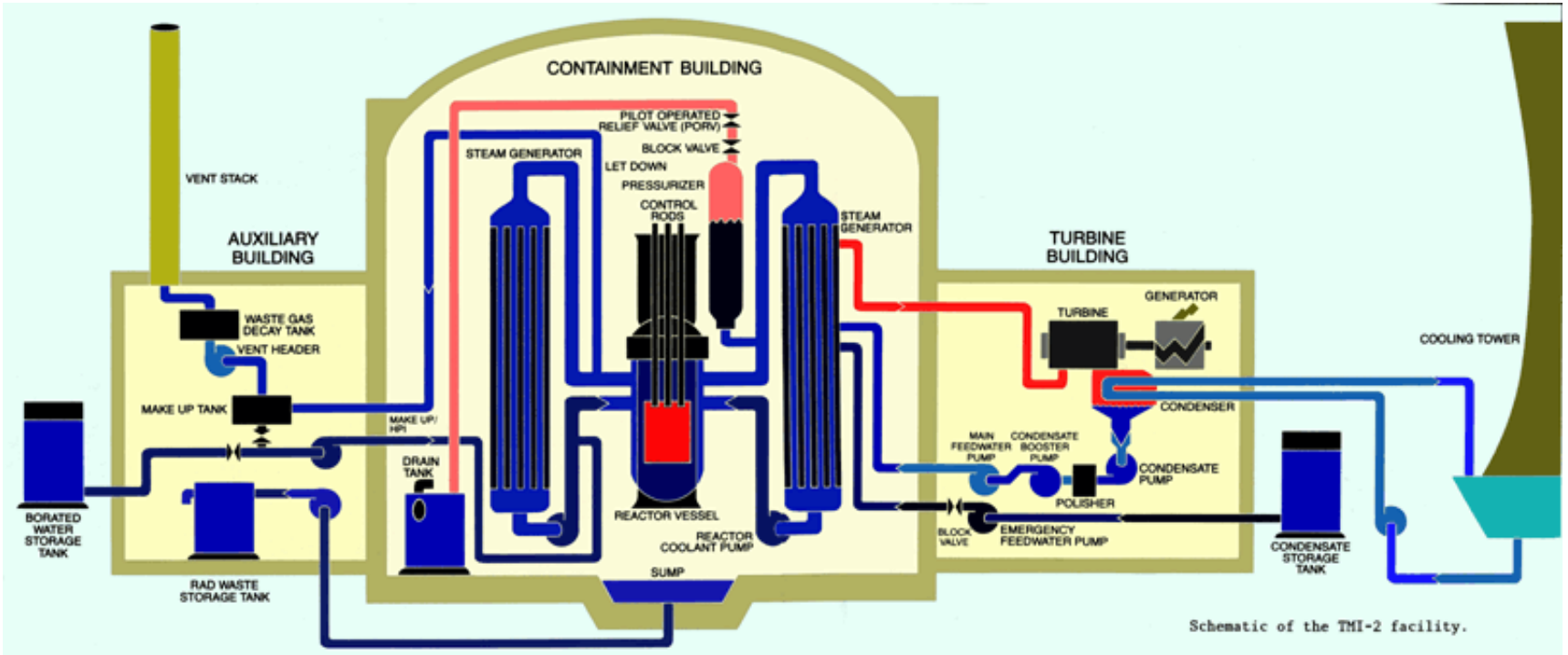
TMI-2 (USA, 1979; Reactor PWR 930 Mwe, 2 lazos B&W)



Courtesy: Nuclear Regulatory Commission

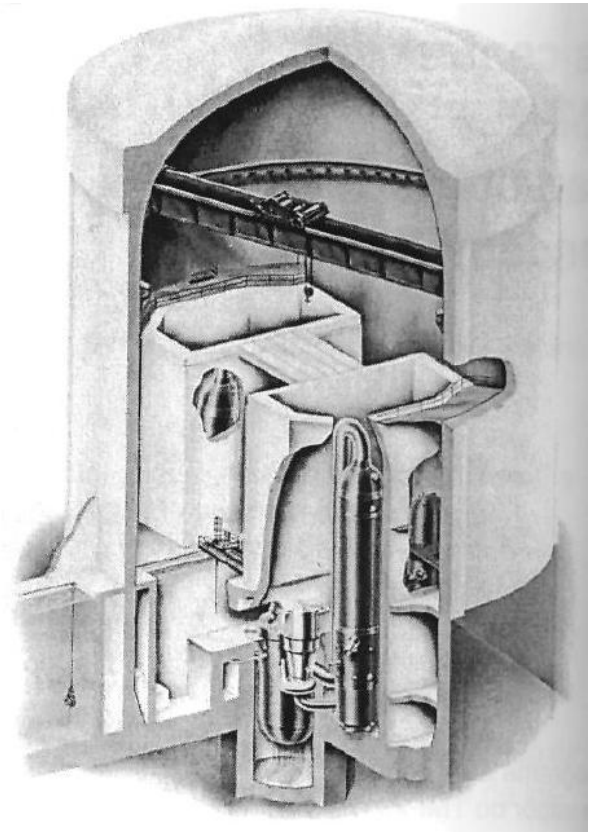
SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs

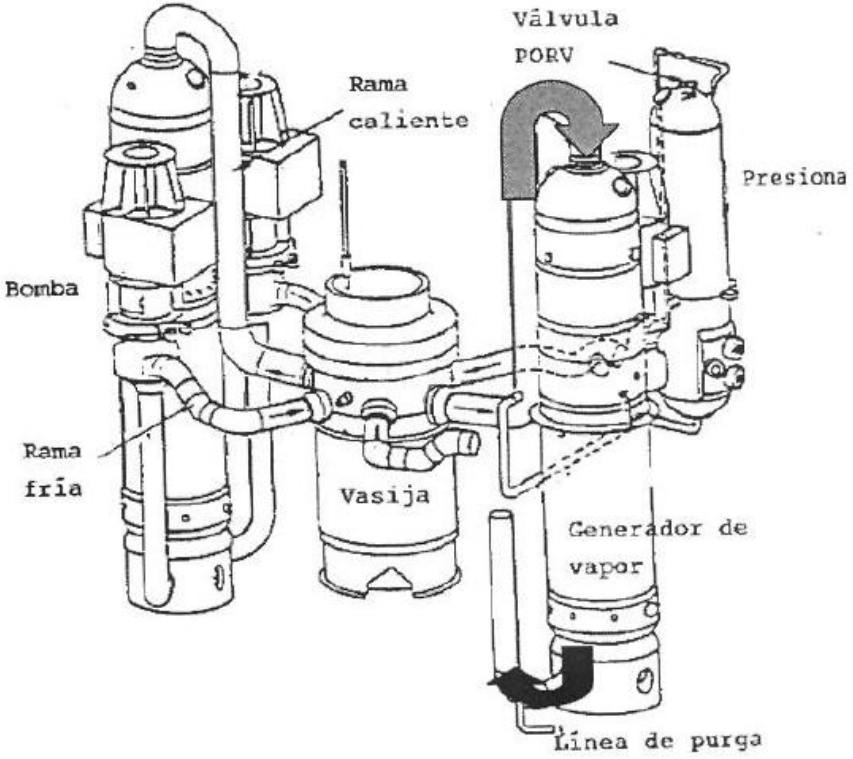
TMI-2 (USA, 1979; Reactor PWR 930 Mwe, 2 lazos B&W)



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs

TMI-2 (USA, 1979; Reactor PWR 930 Mwe, 2 lazos B&W)

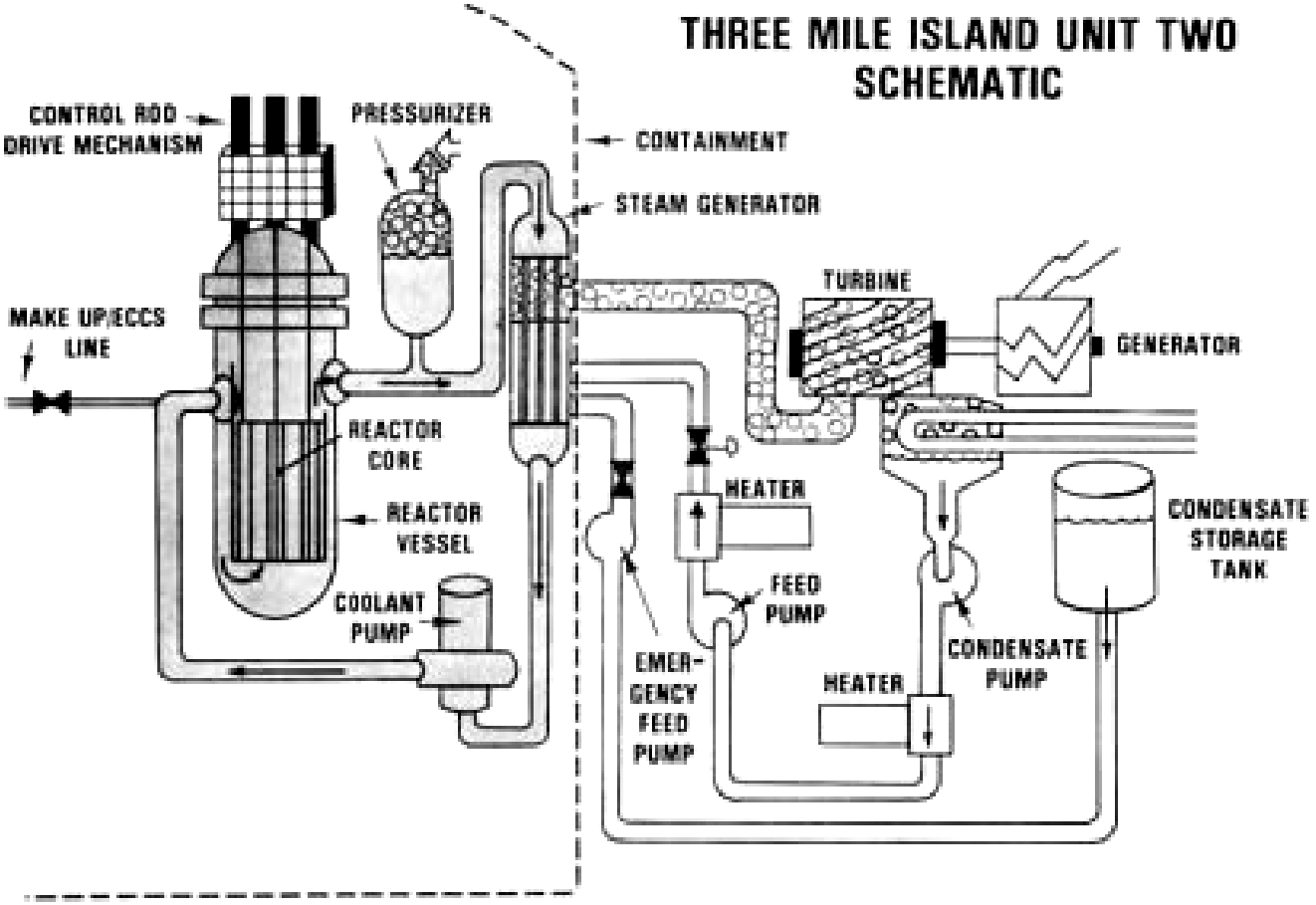




SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2

- Disparo de turbina (por fallos en MFW) sin disparo de reactor (defecto de diseño del Sistema de Protección de Reactor).
- Válvulas de aislamiento de la alimentación a los GVs cerradas (error de post-mantenimiento): el reactor evapora todo el agua de los GVs en 1.5 min.
- Sin GVs (“sumidero de calor”), el reactor se calienta, disparando por “alta presión”.
- Una válvula de alivio del presionador (abierta para aliviar la sobrepresión del RCS) quedó abierta bloqueada (fallo de un componente de seguridad).

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2

- La fuga a través de esta válvula, conducida hacia el Tanque de Alivio, pasó inadvertida a los operadores ya que el panel de control indicaba “válvula cerrada” (error del Sistema de Control).

- Además, la válvula había fugado anteriormente, así que la alta temperatura en la línea de drenaje (indicativa de fuga en la válvula) no fue tenida en consideración (error en la interpretación de la situación).

- Rompe el disco de seguridad del tanque de alivio, y se libera vapor radiactivo al edificio de Contención.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2

- La fuga provoca una caída de la presión del RCS, lo que genera una “vaporización súbita” de agua que provoca una falsa señal de aumento de nivel en el presionador.

- La caída de presión arranca en auto las bombas de refrigeración de emergencia, pero los operadores las paran porque suponen que el RCS “está sólido” (actuación incorrecta consecuencia del error en la interpretación de la situación).

- Solo han pasado “8 minutos” desde el disparo de turbina...

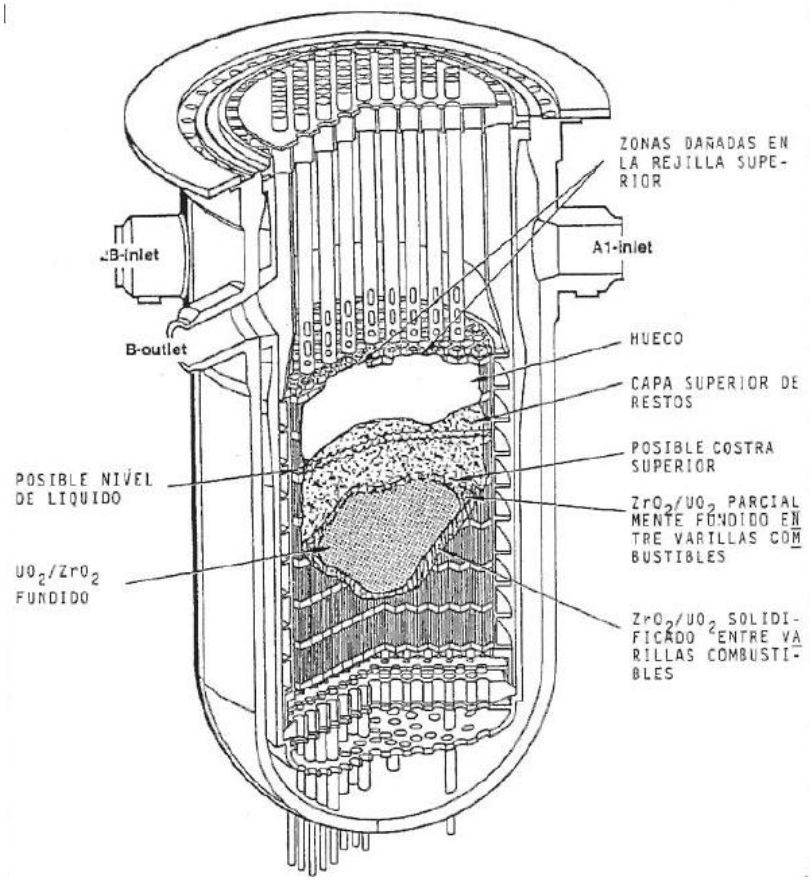
SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2

- Las bombas de refrigeración normal vibran excesivamente, por lo que los operadores deciden pararlas, con lo cual se interrumpe la circulación de refrigerante a través del núcleo (se corta la “circulación natural”).
- El sistema bifásico L-V del RCS se decanta hacia la fase vapor, generando una burbuja sobre el núcleo que provoca un descubrimiento del mismo, con el consiguiente sobrecalentamiento.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2

- Las vainas se degradan (oxidación, hidruración), hasta la fusión parcial del núcleo (~ 40%).
- Se re-arrancan bombas de refrigeración de emergencia (200 minutos).

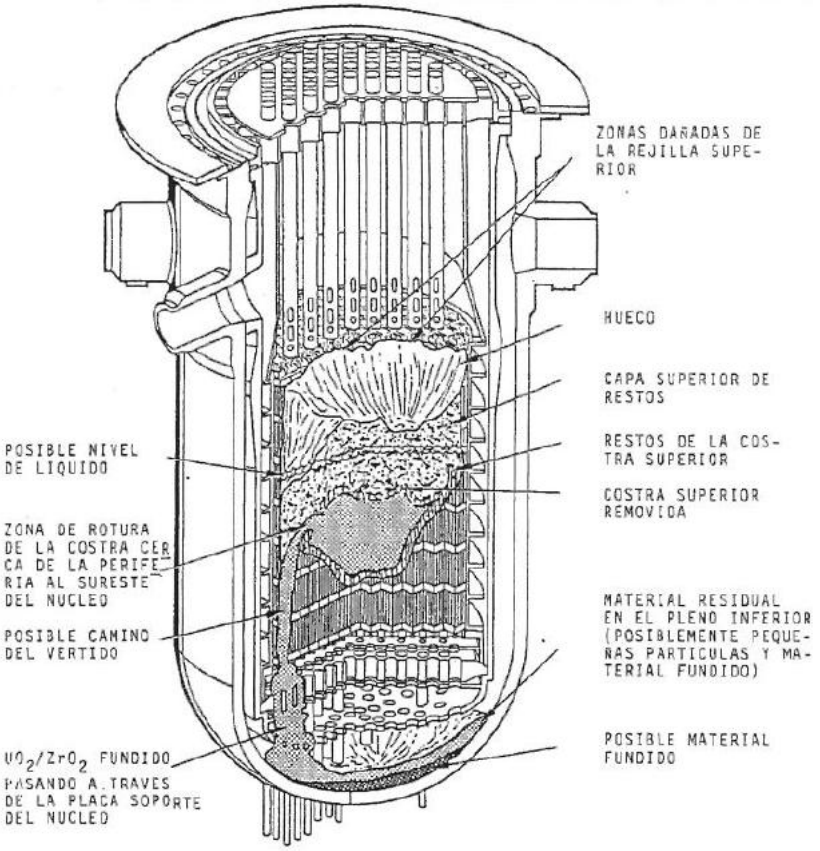
Daño estimado del núcleo del reactor de TMI-2 justo antes de la rotura del crisol. (224 min)



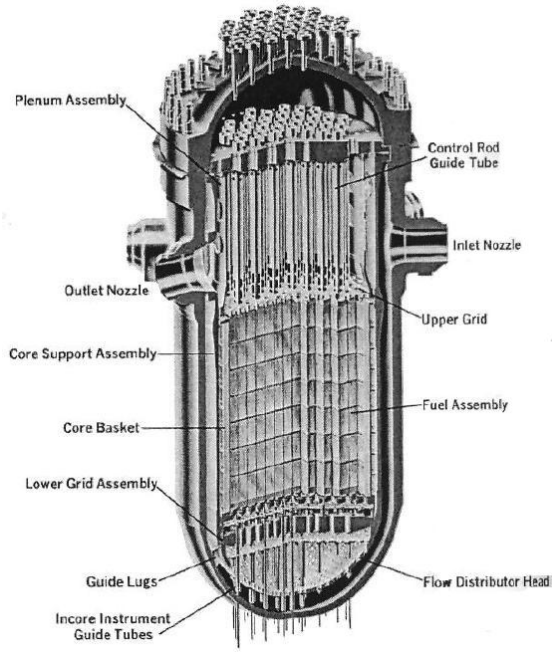
SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2

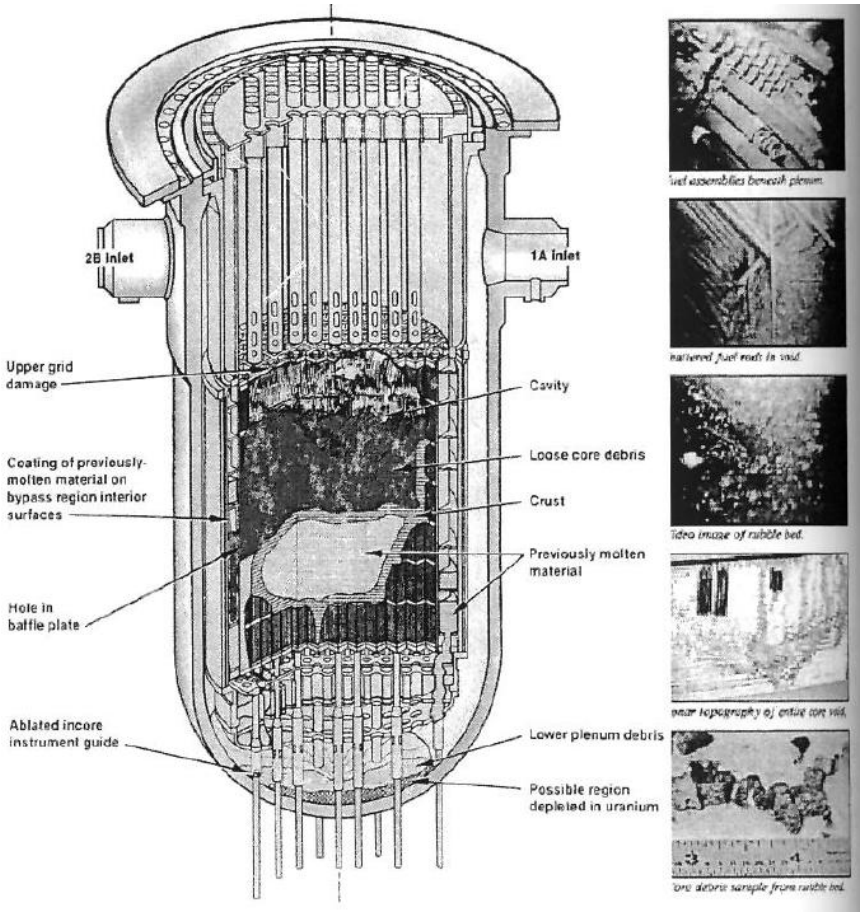
- Refrigeración del “crisol” del núcleo que impide la fusión total.
- Minuto 226: estabilización de la planta.

Daño estimado del núcleo del reactor de TMI-2 durante el vertido de la masa fundida al fondo de la vasija.



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs TMI-2





Estado inicial (arriba) y final (derecha) del reactor y de la vasija.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs
TMI-2. Impacto Radiológico (Informe Kemeny)

- Actividad liberada: 10 MCi de GNs (Xe-133) & 27 Ci I-131.
- D individual máxima Φ < 5 millas : 0.7 mSv.
- DC Φ < 50 millas: 20 Svp (< 1% dosis por radiación natural).
- No se esperan efectos apreciables en la salud de la población afectada.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs
TMI-2. Lecciones aprendidas

- Mejoras en **Operación, Diseño y Análisis de Accidentes**
  - POEs
  - Instrumentos y ESC de salvaguardias
  - Análisis frente a pequeños LOCAs
- Mejoras en **Planificación de Emergencias**
- **Entrenamiento** de Operadores
  - Simuladores específicos para cada planta
  - Refuerzo de los requisitos de cualificación
- **Intercambio de EOaj**: creación de INPO (UNESA) para autoevaluación y emisión de “recomendaciones”.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs
Otros Accidentes Históricos

ENRICO FERMI, USA, 1966, Reactor superrápido

- Flujo bloqueado por componente suelto entre dos elementos combustibles.
- Daños limitados y recuperables: retorno a operación normal a los 4 años.

SAINT LAURENT, FRA, 1969, GCR

- Flujo bloqueado por mala reposición de componentes tras la recarga.
- Daños a 10 elementos: aprox. 10 kg de núcleo fundido.

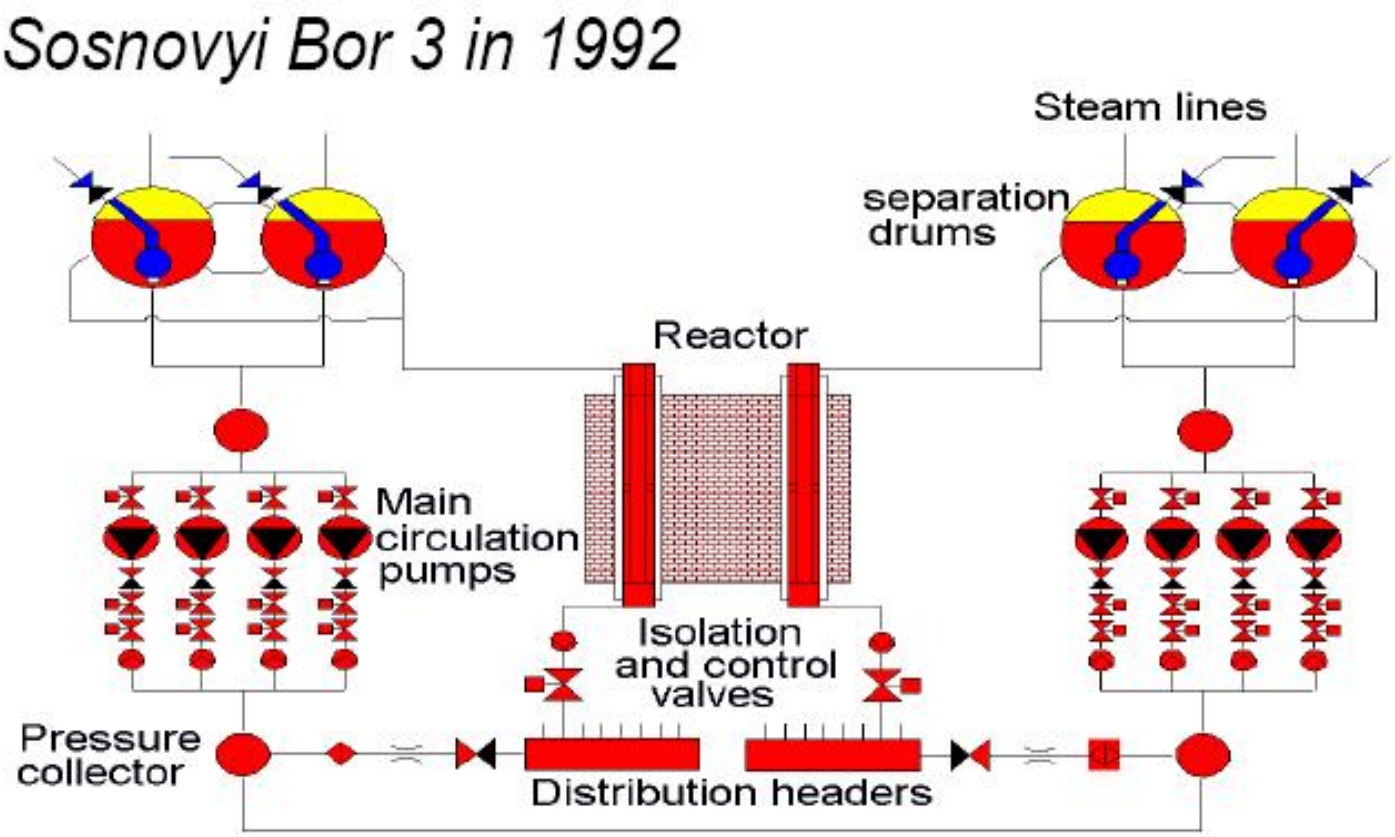
JASLOVSKE BOHUNICE, CHE, 1977, GC-HWR 560 Mwt (ruso)

- Flujo bloqueado por bolas de sílice que no se retiraron de un elemento antes de retornarlo al núcleo.
- Fusión del elemento poco después del arranque, con daños severos, con cierre definitivo (siguen en curso las labores de descontaminación).

SOSNOBYI BOR, 1992, Reactor superrápido

- Flujo bloqueado por internos sueltos de una válvula de control dañada debido a un error de mantenimiento.
- Daños limitados (un elemento fundido parcialmente) y recuperables.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: LOCAs
Otros Accidentes Históricos



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs

El accidente es causado por una pérdida de control de la potencia nuclear que genera un desequilibrio neutrónico y el consiguiente sobrecalentamiento del núcleo.

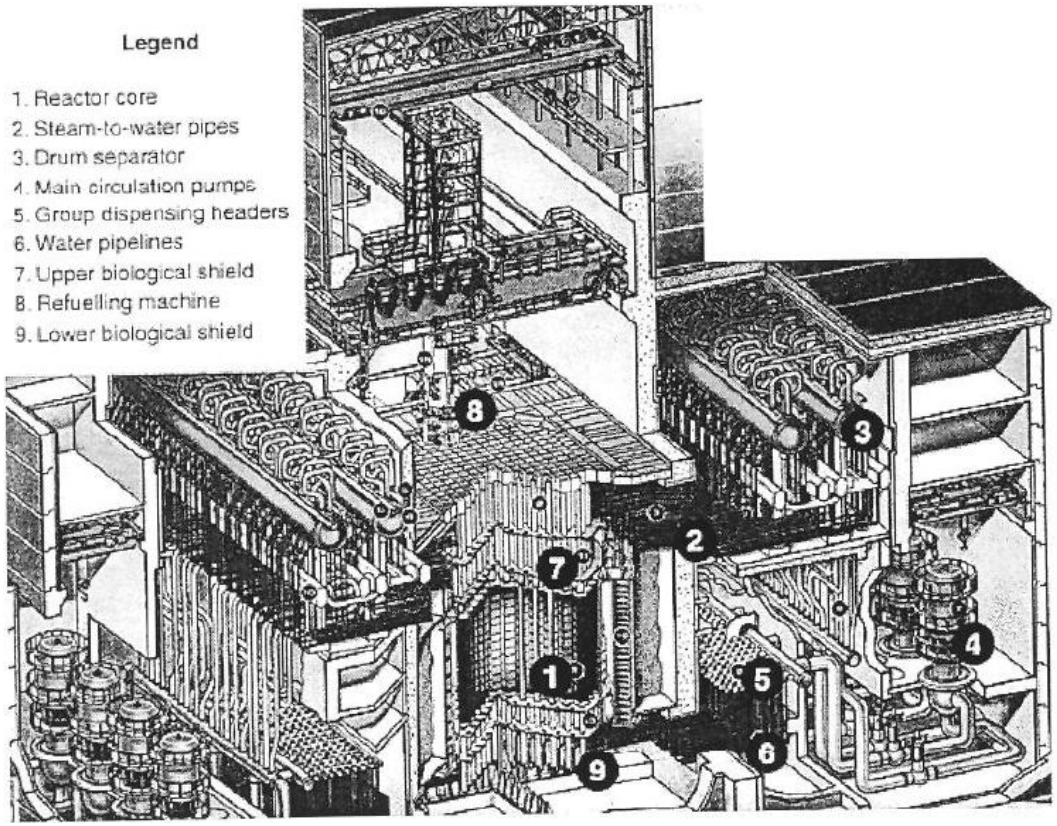
Posibles causas:

- Extracción (PWR) o caída (BWR) incontrolada de barras de control durante paradas.
- Fallos en la inserción de barras de control (ATWS)
- Entrada inadvertida de refrigerante frío o incremento de caudal de refrigerante.
- Disminución de la concentración de boro disuelto en el refrigerante.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4 (URSS, 1986; RBMK 1000 Mwe)

- Reactor de agua en ebullición moderado por grafito.
- Altura activa de 7 m, dentro de una vasija cilíndrica de $\phi 15$ y h10m, con dos tapas a modo de blindaje de e3m (superior) y 2m (inferior).

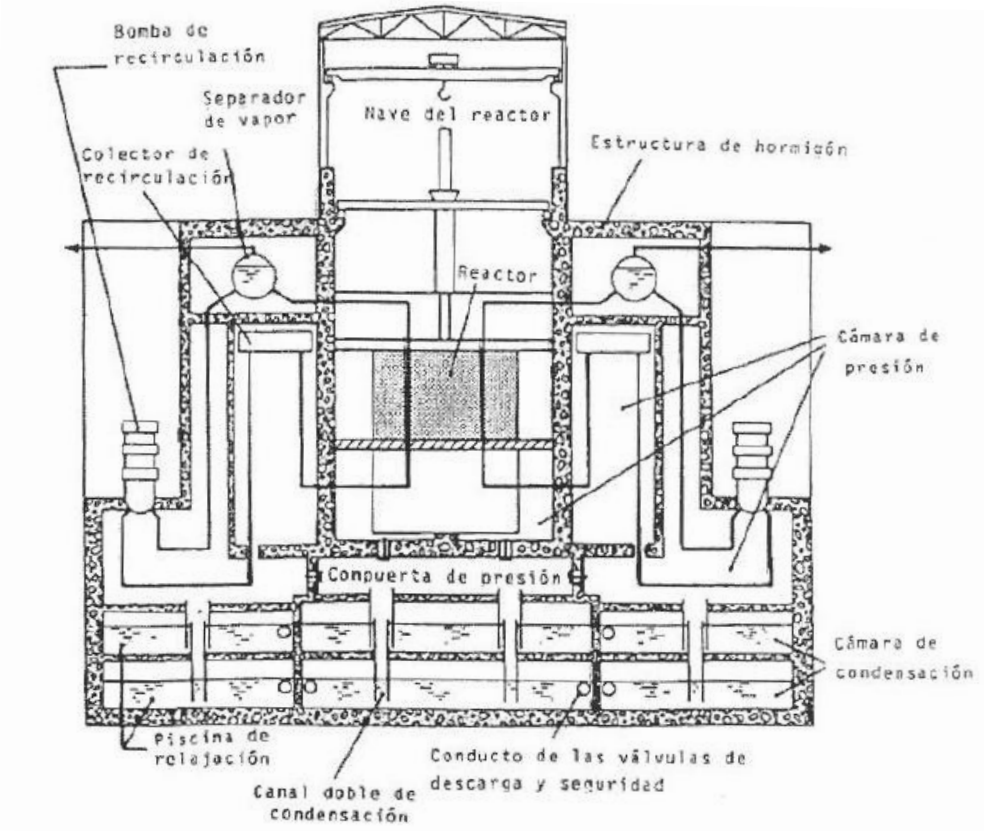
SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4 (URSS, 1986; RBMK 1000 Mwe)



Esquema de Chernobil-4.

La tecnología es tremendamente compleja, una maraña de tubos, válvulas y soldaduras

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4 (URSS, 1986; RBMK 1000 Mwe)

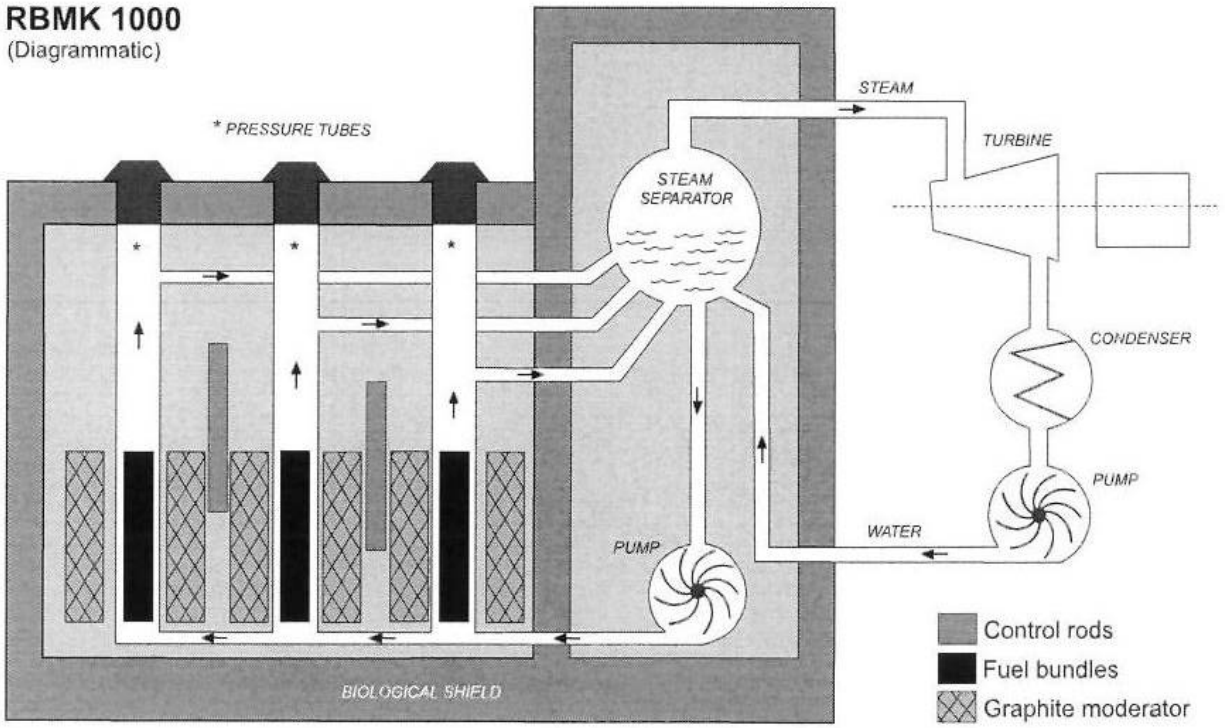


Esquema de Chernobil-4.

No tenía edificio de contención como tal.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4 (URSS, 1986; RBMK 1000 Mwe)

Figure 2. The RBMK reactor



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Suceso iniciador

Aislamiento intencionado de la segunda turbina para un experimento a potencia en un estadio intrínsecamente inestable del reactor (coeficiente de potencia positivo por debajo de 700 Mwe).

¡¡¡ GRAVE ERROR DE OPERACIÓN
QUE EVIDENCIA UNA ACUSADA
FALTA DE CULTURA DE SEGURIDAD !!!

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Evolución del accidente

- Durante la prueba, y por un error, la planta se puso a 30 Mwt, cuando se requerían 1000, lo que provocó una inserción de reactividad negativa que se compensó extrayendo las barras de control MUY POR ENCIMA DE LO ESTABLECIDO EN LOS PROCEDIMIENTOS.

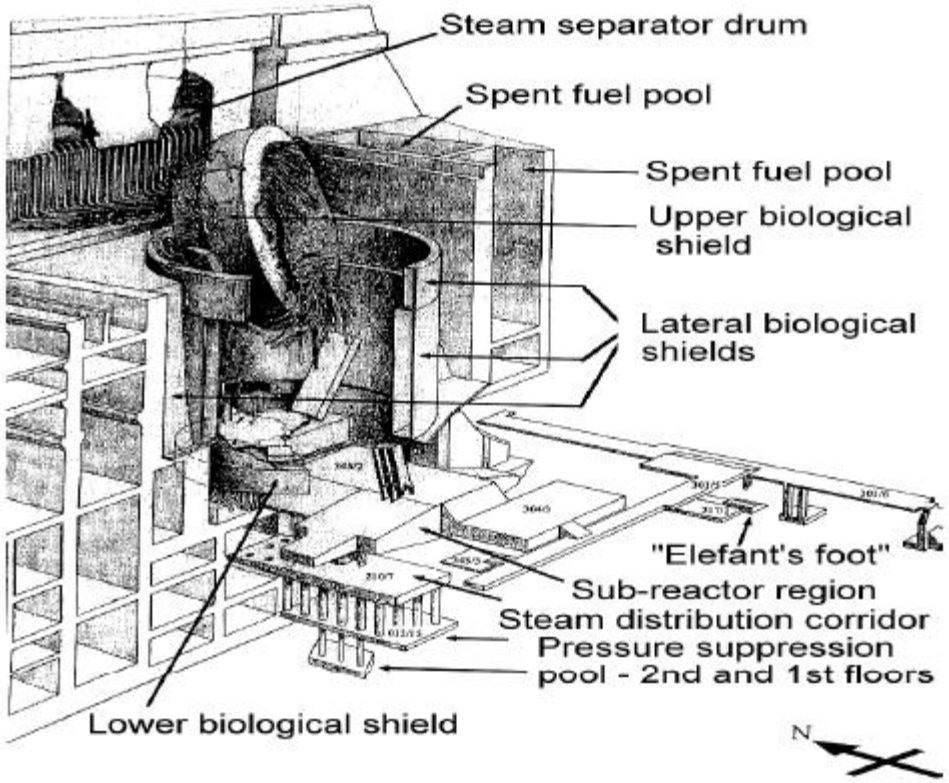
- Con el reactor en esta muy inestable situación, los operadores deberían haber abortado la prueba, pero DESCONECTARON EL SISTEMA DE PROTECCIÓN, fiándose de sus habilidades manuales para el control.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Evolución del accidente

- Cuando el operador detecta un transitorio de reactividad e inicia una parada rápida, se produce un aumento súbito de "la fracción de huecos" que genera un sobrecalentamiento del núcleo, desintegrándose el combustible de forma violenta.

- Se produjeron reacciones químicas muy exotérmicas (explosiones de vapor, 2 en 3 segundos, e hidruración del Zr de las vainas, la cual genera hidrógeno a alta energía).

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Evolución del accidente



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Evolución del accidente

- Como consecuencia de estos violentos fenómenos se destruye buena parte del núcleo, del edificio que lo alojaba (no “contención”) y de los edificios colindantes:
  - Rotura de varios tubos de refrigeración y levantamiento de la losa superior (una pieza de 1000 Tm y anclada) varios metros.
  - Expulsión violenta de bloques de grafito, trozos de barras de control y elementos metálicos estructurales muy calientes.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4: Evolución del accidente

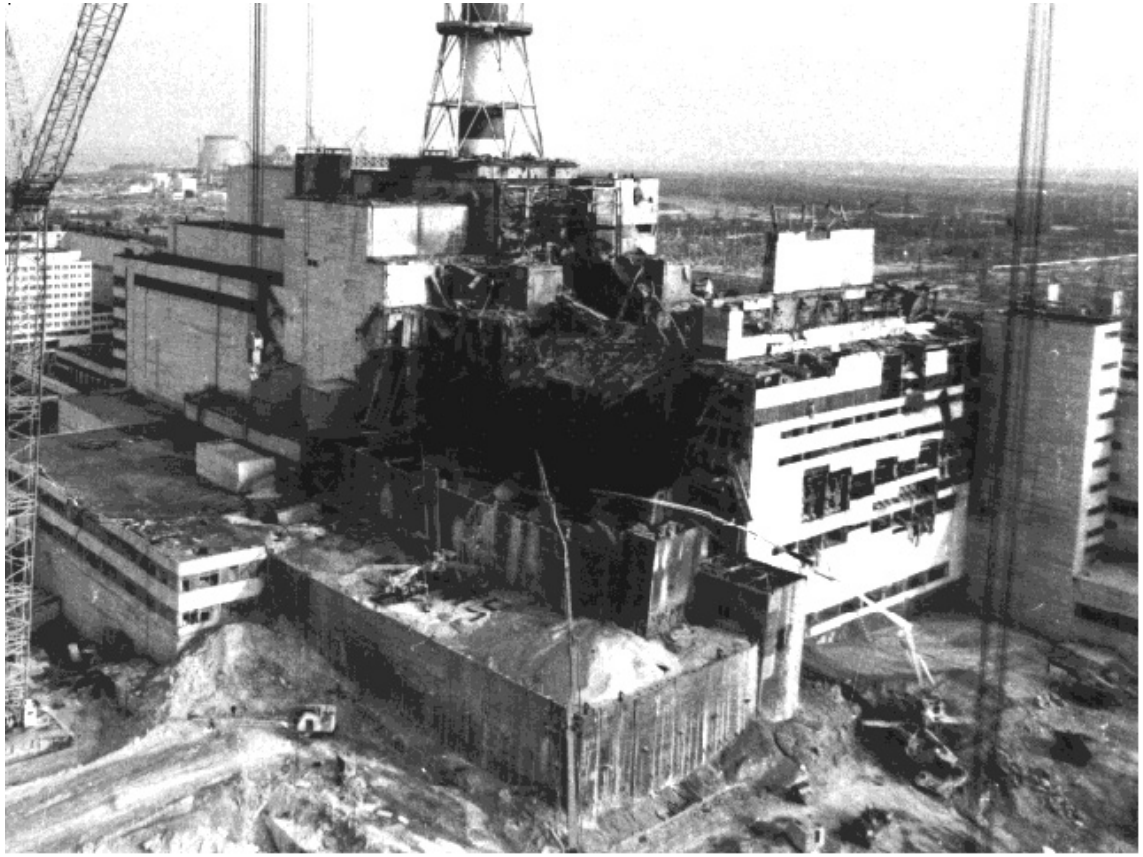
- Se generan incendios en los tejados de asfalto de los edificios auxiliares colindantes y se descubre el grafito del núcleo y el combustible, incendiándose finalmente.

- 6 Tm (3.5%) del combustible fue expulsado a la atmósfera en forma de partículas; 130 Tm de combustible fundido (70% del núcleo) generaron emisiones elevadas de productos de fisión volátiles (GNs, iodos…)

CHERNOBYL-4. Evolución del accidente

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Evolución del accidente

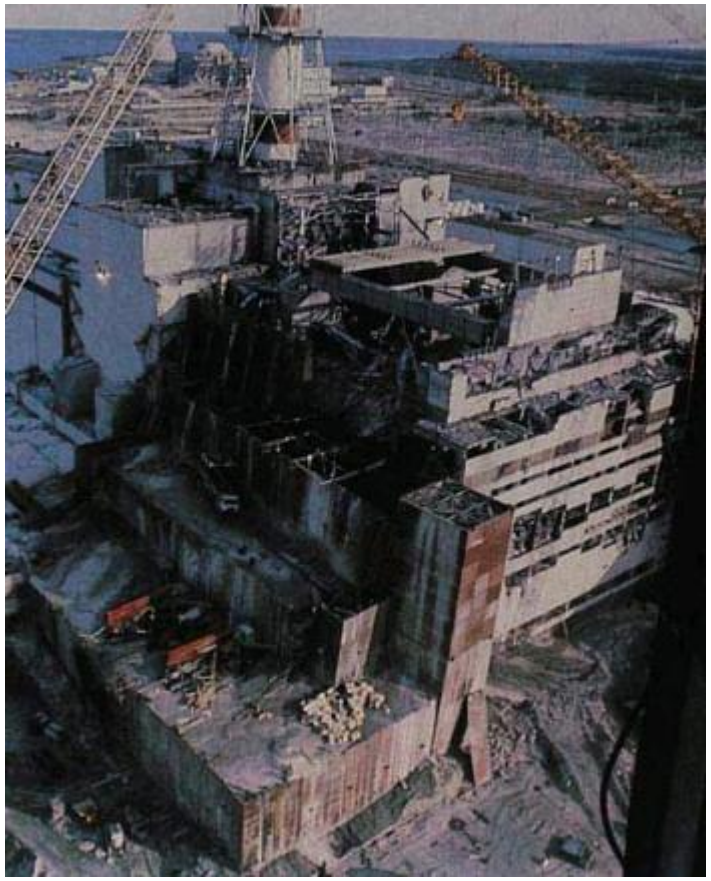
SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Evolución del accidente



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs CHERNOBYL-4. Gestión del accidente

- Lucha contra los múltiples incendios provocados por los fragmentos a altas temperaturas.
- Lanzamiento desde helicópteros de > 5000 Tm de materiales (CB_3, Pb, Dolomita, Arcilla, Arena) para prevenir la criticidad, reducir la temperatura, sofocar el incendio del grafito y mitigar los escapes radiactivos (medida poco eficaz ya que no caían sobre el núcleo…).
- Construcción de un túnel para inyectar N_2 líquido sobre el “corium” fundido (tampoco esta medida fue muy significativa…).
- Descontaminación de las otras Unidades para poder continuar con su explotación.
- Diseño y construcción del sarcófago.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Gestión del accidente

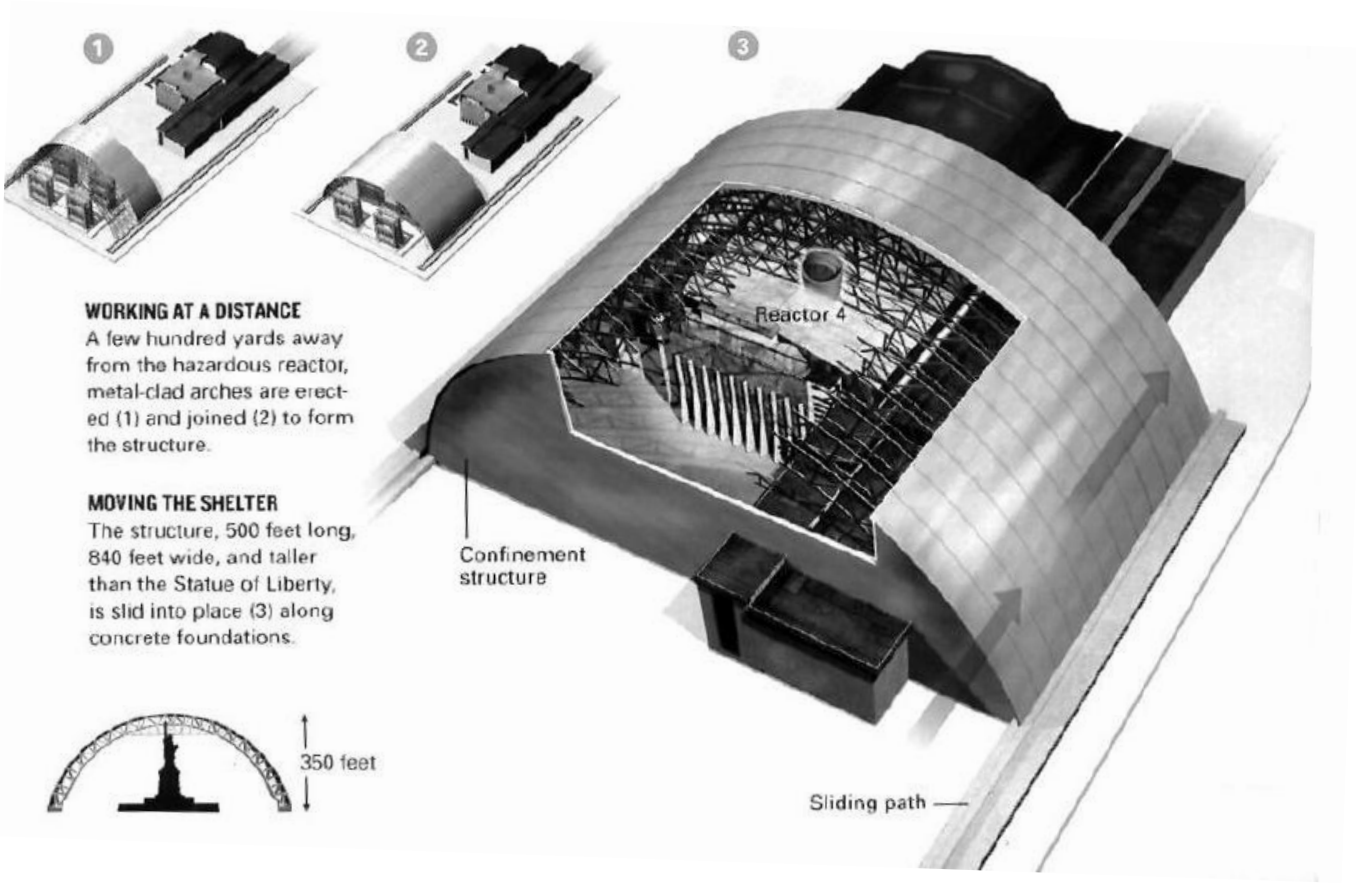


SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Gestión del accidente

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Gestión del accidente: Sarcófago

- Tiempo récord para su construcción, pero presenta abundantes grietas.
- Su colapso podría liberar > 5 Tm de productos radiactivos.
- Se ha creado un Proyecto Internacional para construir una sobrecubierta aceptable.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Gestión del accidente: Sarcófago



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs CHERNOBYL-4. Gestión del accidente: Protección a la población

- Suministro de IK y evacuación > 135 kp en < 30 km radio (medida tardía).
- Criterios radiológicos para la evacuación:
  - LAD (mSv/a): 100[1986]; 30[1987]; 25[1988]
  - Dosis vida integrada: 350 mSv [1990]
  - CS > 40 Ci/km2 (150 Bq/cm2) – población en general
  - CS > 15 Ci/km2 (50 Bq/cm2) – embarazadas / niños < 12a

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs CHERNOBYL-4. Dispersión atmosférica y contaminación del terreno

DISTANCIAS (km)	CS (Bq/cm2)	Área (Mm^2)	% territorio europeo	Contaminantes
< 30 zona de exclusión	>150	3	0.04	Combustible nuclear
30-100 alta contaminación	150 – 50	7	0.10	Combustible, óxidos
100-2000 baja contaminación	50 – 4	230	3.00	Volátiles (I, Te, Cs)
>2000 contaminación despreciable	< 4	1300	17.00	Volátiles de vida larga (Cs)

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Dispersión atmosférica y contaminación del terreno

Países	% Contaminación depositada en Europa
Bielorrusia	34
Rusia	24
Ucrania	20
Suecia	4
Finlandia	4
Bulgaria	3
Austria	3
Noruega	2
Rumania	2

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Situación actual de zonas y hábitats contaminados

Zonas	Situación actual
Urbanas	Descontaminadas y, en general, habitables salvo en la zona de exclusión
Agrícolas	Medidas para reducir la contaminación en productos agropecuarios
Bosques	Evolución natural; ciertos productos aún contaminados (setas, bayas)
Acuíferos	Poco significativos, salvo en casos puntuales (lagos); medidas para prevenir la movilidad de contaminantes

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
CHERNOBYL-4. Situación actual de zonas y hábitats contaminados

Vistas de la ciudad de Pripyat

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs CHERNOBYL-4. Niveles de dosis

Niveles de dosis de las poblaciones más expuestas

Grupo	Cantidad aprox. (en miles)	Tipo de exposición	Nivel de exposición (mSv)
Evacuados ZE	135	CE T (niños)	Rango 50-500 / promedio 120 Rango 5-125 Gy / promedio 15
Habitantes ZAC	270	CDE (interna) T (niños)	>100 (4%) / promedio 60 Rango 5-500
Liquidadores	600	CE	0.02% >500 / 8% >250 47% >100 / 45% <100
URSS-parte europea	75000	CDE (interna)	Promedio 7

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs CHERNOBYL-4. Efectos biológicos de la población más expuesta

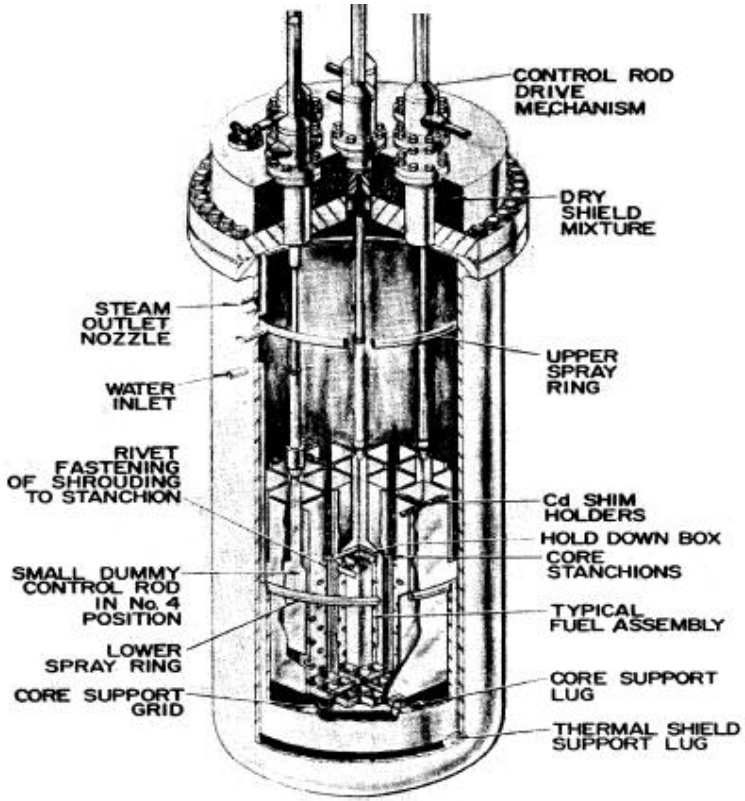
- 134 casos de Síndrome de Irradiación Aguda, de los que 28 fallecen en 1986.
- 19 fallecimientos de 1987 a 2004, no todos atribuibles al accidente.
- Liquidadores: el 5% (30.000) fallece entre 1986 y 1998.
- 5.000 cánceres en tiroides (15 muertos), con una tasa de supervivencia del 99% (datos de Bielorrusia).
- Estimaciones a largo plazo: 16.000 fallecimientos por cáncer en toda Europa hasta 2065.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
Otros Accidentes Históricos

SL-1 (1961) (Prototipo de BWR)

- Durante una parada, debido a una deficiencia de diseño, el reactor se hizo crítico al retirar una barra de control.
- La excursión de potencia provocó un pico de presión que causó daños severos al núcleo.
- Los tres operarios presentes en el edificio del reactor fallecieron.
- Los efectos ambientales fueron mínimos debido al pequeño tamaño del reactor y a la correcta retención de los productos de fisión.

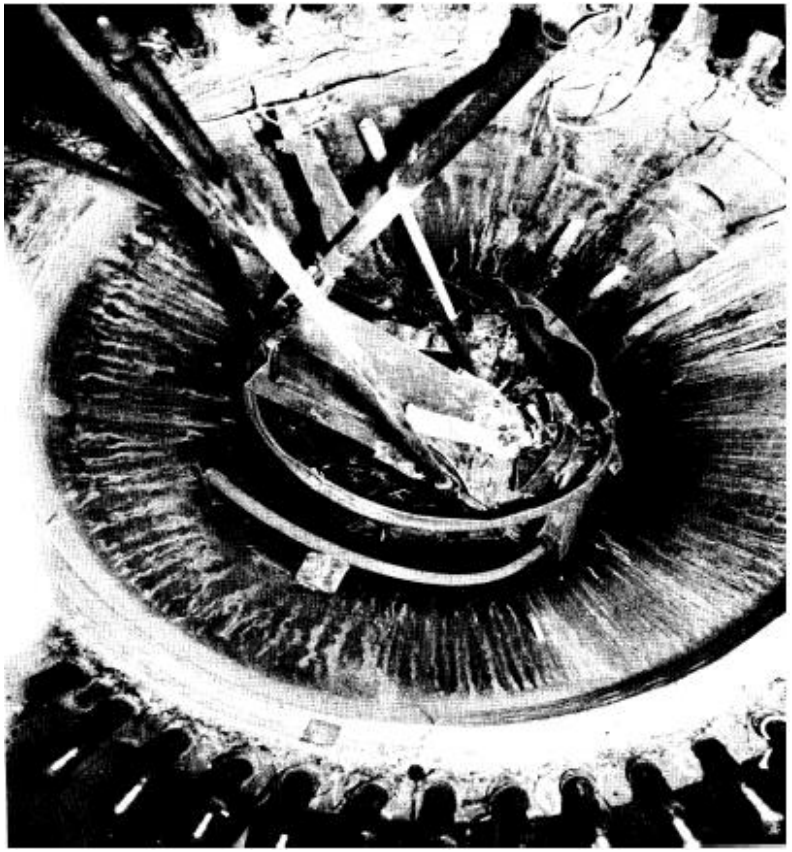
SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
Otros Accidentes Históricos



Características del prototipo de BWR, SL-1

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES: RIAs
Otros Accidentes Históricos

Vista de los daños en el reactor SL-1 (1961)



SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES

Los mecanismos por los que se desencadenan daños en el núcleo de un reactor nuclear y los fenómenos que se producen subsiguientemente son bastante conocidos y predecibles:

- Los desequilibrios entre la potencia nuclear y la capacidad de refrigeración (extracción de calor) provocan un recalentamiento de las vainas (varillas conteniendo los elementos de combustible).

- Seguidamente, se produce la oxidación del Zr de las varillas con consiguiente aparición de hidrógeno (por la reacción metal-agua entre el vapor a alta temperatura y el metal).

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES

Sin embargo, la evolución del accidente después de producidos los daños en el núcleo (accidente severo) puede variar ampliamente en función de:

- Grado de afectación del núcleo
- Fallos en el RCS
- Fallos en el Edificio de Contención

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Grado de afectación del núcleo

Los análisis y valoraciones para estimar daños al núcleo adolecen de numerosas y significativas incertidumbres, lo que dificulta disponer de herramientas fiables para establecer previsiones de control y mitigación.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el RCS (1)

- Como consecuencia de los daños severos al núcleo, el circuito primario soporta picos de P y/o T (por excursiones de potencia, por interacciones del agua con el núcleo sobrecalentado o fundido, o por los propios gases calientes que se generan en el núcleo dañado).

- Estos picos pueden provocar la rotura de alguno de los componentes del RCS, trasladando cargas térmicas y de presión a la Contención de manera incontrolada.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el RCS (2)

- Las zonas del RCS más susceptibles de rotura son:
  - la base de la vasija (acumulación de núcleo fundido – en TMI la vasija, sin embargo, permaneció intacta).
  - la línea de equilibrio del presionador.
- Dado que mientras el núcleo fundido permanece en la vasija las cargas que soporta la Contención son “manejables”, ya que provienen solamente de los venteos (controlados) y/o fugas (previsibles) del RCS (H_2 y vapor de agua), los operadores están entrenados para aliviar la presión del primario evitando alcanzar los límites establecidos en las Bases de Diseño para el fallo de la vasija – la interacción del núcleo fundido (“corium”) con el hormigón de la contención crearía una situación muy comprometida y de evolución muy incierta.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el RCS (3)

- Sin embargo, bajas presiones en el RCS son contraproducentes para la refrigeración del núcleo fundido, por lo que los alivios de presión (por venteos controlados y/o por fugas) incrementan el riesgo de fallo de la vasija.
- En TMI-2 la presión del RCS permaneció relativamente alta, postulándose que si se hubiera reducido – por venteos manuales, el núcleo fundido se hubiera sobrecalentado pudiendo llegar a provocar el fallo de la vasija.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (1)

- Las cargas de P y/o T que debe soportar la Contención dependen, primeramente, de la cantidad y temperatura de los gases venteados desde el RCS (H_2 y vapor de agua), y, en caso de rotura de la vasija, del comportamiento de la masa de núcleo fundida vertida a los sumideros del edificio.

- Por diseño, en los reactores PWR y BWR solo grandes cantidades de gases pueden provocar picos de P en Contención.

- Sin embargo, y dado que la atmósfera de Contención no es inerte, la presencia de H_2 puede provocar deflagraciones y explosiones, favorecidos, además, por P y T elevadas.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (2)

- En TMI-2 se liberaron unos 400 kg de H_2 de la oxidación de un 75 del zircaloy, que ardieron durante unas 10h después de iniciado el transitorio, consumiendo unos 600 kg de O_2.
- La Contención aguantó el pico de P, ayudada por la actuación automática del Rociado.
- Un incendio similar en un reactor BWR sin contención inerte o en un PWR sin rociado podría haber provocado el fallo de la Contención.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (3)

Además de los picos puntuales de P y/o T provocadas por la mezcla H_2/vapor de agua en los venteos y/o fugas por roturas, se crean una cargas “de larga duración” (por el propio H_2 y otros gases no condensables), de modo que es fundamental mantener la refrigeración de la contención para evitar alcanzar la temperatura de saturación del agua.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (4)

Si la vasija falla y libera el núcleo fundido se pueden producir interacciones “corium”-agua, que también pueden provocar picos de P, más significativos en las cotas inferiores del edificio – que estarían inundadas.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (5)

Chernobyl es un ejemplo de este tipo de interacciones, si bien parece que no se produjeron de manera violenta (alta viscosidad y baja temperatura del “corium”), formando “ríos de lava” o “pies de elefante” – este comportamiento, no obstante, no es generalizable a los reactores occidentales, dado que las características de la masa fundida dependen sobremanera del diseño del reactor.

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (6)

Pies de elefante (Chernobil-4)

SUCESOS INICIADORES DE ACCIDENTES NUCLEARES
Fallos en el Edificio de Contención (7)

Asimismo, en estos casos, se puede producir también interacción del núcleo fundido con el hormigón del edificio, generándose una mezcla de muy difícil refrigeración y más gases incondensables y a altas temperaturas, lo que supone un nuevo y significativo contribuyente al aumento de la presión de Contención, y de muy compleja gestión.

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE

Medios y métodos que se pueden utilizar para:

- Limitar los daños en el núcleo
- Prevenir o minimizar fugas de contención
- Limitar o eliminar la liberación de productos radiactivos al exterior

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Funciones Críticas de Seguridad (FCS)

5 criterios de diseño que gestionan, mediante procedimientos al efecto (IOEs) las tres prioridades de la “mitigación de accidentes” (daños en el núcleo, fugas de contención, liberación de productos radiactivos al exterior):

- Subcriticidad (S)
- Refrigeración del Núcleo (C)
- Sumidero de Calor (H)
- Integridad del Primario (I)
- Integridad de Contención (R)

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Limitación de daños al núcleo

- Recuperar refrigeración suficiente inyectando agua en el RCS, con los Sistemas disponibles.

- Agua con veneno neutrónico suficiente (BORO) para, además, minimizar la posibilidad de recriticidad, dado que las barras de control estarán, previsiblemente, también fundidas y, por tanto, inservibles).

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Limitación de fugas de contención

Reducir o eliminar las cargas de P y/o T mediante:

- venteos controlados del primario junto con la combustión controlada de H_2 y O_2 en “quemadores” al efecto Limitación de fugas de contención.
- sistemas de rociado o de ventilación.
- venteos controlados del propio edificio de Contención.

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Limitación de liberación de los productos radiactivos (1)

Factores determinantes

- Solubilidad de la MPF en agua:
  - los gases nobles son “incondensables”
  - formación de derivados orgánicos de yodo “no solubles”
- Capacidad de filtrado de las emisiones al exterior (cuestionable para alta humedad y/o T)

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Limitación de liberación de los productos radiactivos (2)

Métodos disponibles

- Rociado de Contención (con aditivos de pH alto para generar “yoduros”)
- Piscinas “de supresión” para venteos del RCS (BWR)
- HVAC con filtros HEPA/CA (no eficaces para GNs ni organoyodados)
- GVs “intactos” (PWR)

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Subcriticidad

- **Métodos disponibles**
  - Inyección de agua borada al RCS (HP-MP-LP.IS)
  - Inserción de barras de control
- **Problemas**
  - Las burbujas generadas en las líneas del RCS pueden provocar excursiones de potencia en las inyecciones de agua al núcleo (la “fracción de huecos” tiene un coeficiente “positivo”).
  - Las barras de control funden antes que las de combustible, por lo que pueden no estar disponibles para penetrar en el núcleo.

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Refrigeración del núcleo – Sumidero de Calor

- **Métodos disponibles**
  - Inyección de agua al RCS (HP-MP-LP.IS)
  - Inyección de agua al circuito secundario (GVs en PWR)
  - Reducción de P en RCS y/o GVs (sistemas “en saturación”)
- **Problemas**
  - Dificultades para refrigerar el núcleo si se forma una bola fundida.
  - Posibilidad de fallo de vasija si la masa fundida alcanza el fondo de la misma.
  - Rotura de tubos de GVs (SGTR - PWR).
  - Roturas de líneas de vapor principal.

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Integridad de Contención (1)

- **Métodos disponibles**
  - Control de P/T (gases calientes y/o vapor) y [H_2] en Contención: penetraciones “reforzadas”, doble contención (PWR-KWU), rociado “exterior” [Zorita].
  - Evitar interacciones del núcleo fundido con el hormigón (integridad vasija): inundación de contención por fallo de vasija, cavidades de reactor de altura limitada.
- **Problemas**
  - Bajas presiones en el RCS (convenientes para bajar la temperatura del núcleo) dificultan la refrigeración de la masa fundida – en TMI.2 la presión se mantuvo alta, y la vasija no falló.

MITIGACIÓN DEL ACCIDENTE
Integridad de Contención (2)

No se produjeron explosiones de vapor en TMI-2 (RCS a alta presión) ni CH-4 (“corium” de alta viscosidad y baja T y elevada presencia de materiales estructurales).

DETECCIÓN DE FALLOS EN FCS (1)

- Acción inmediata ante un “transitorio”: verificar disponibles los Sistemas de Control de la Potencia Nuclear y los Sistemas de Refrigeración de Núcleo.
- Árboles de fallos al efecto: IOEs, DFD, AERS

DETECCIÓN DE FALLOS EN FCS (2)

Ejemplos de “sucesos iniciadores” (incluidos en PEI):

- Fallos en elementos combustibles
- Fugas en el RCS (LOCAs y SGTR)
- Fallos en parada automática (ATWS)
- Fallos en la Sala de Control
- Incendios / Sucesos naturales
- Fallos durante el manejo de elementos combustibles

DETECCIÓN DE FALLOS EN FCS (3)

- Factores que condicionan la evolución de estos “iniciadores” (estimación del tiempo disponible antes de que aparezcan daños en el núcleo)
  - Diseño de la instalación (PWR-W, PWR-KWU, BWR-MARK 1/2/3, VVER, CANDU,…)
  - Fiabilidad de los sistemas de seguridad disponibles
  - Capacidad de recuperar funciones de seguridad dañadas
- Lamentablemente, salvo el “diseño”, estos factores son muy difíciles de establecer con claridad, lo que dificulta, a su vez, la evaluación y análisis a priori de este tipo de accidentes.

DETECCIÓN DE DAÑOS EN EL NÚCLEO (1)

Los **sistemas de control del reactor** no están diseñados para "fusión del núcleo" pero sí dan información sobre la aparición de daños en el mismo:

- Inventario de refrigerante (nivel de agua sobre el núcleo)
  - Control directo en BWR (nivel de agua en vasija)
  - Más complejo en PWR - PZR está más elevado que la vasija: nivel en PZR, balance entre caudal de inyección y caudal de fugas, P/T en ramas frías/calientes
- Descubrimiento del núcleo (temperatura en termopares)

DETECCIÓN DE DAÑOS EN EL NÚCLEO (2)

- El inventario del refrigerante del primario se puede evaluar a partir de mediciones del nivel del agua en el presionador y en la vasija del reactor y de la inyección de agua.

- La falta de mediciones del nivel de agua en la zona del núcleo en muchos PWR es compensada por las medidas de presión y de temperatura tomadas en la rama fría y caliente y en el outlet del núcleo.

DETECCIÓN DE DAÑOS EN EL NÚCLEO (3)

- Una vez que el núcleo se descubre, la progresión del accidente se intensifica. La tasa de progresión del accidente se ve afectada por la cantidad de calor residual existente en el momento del accidente.

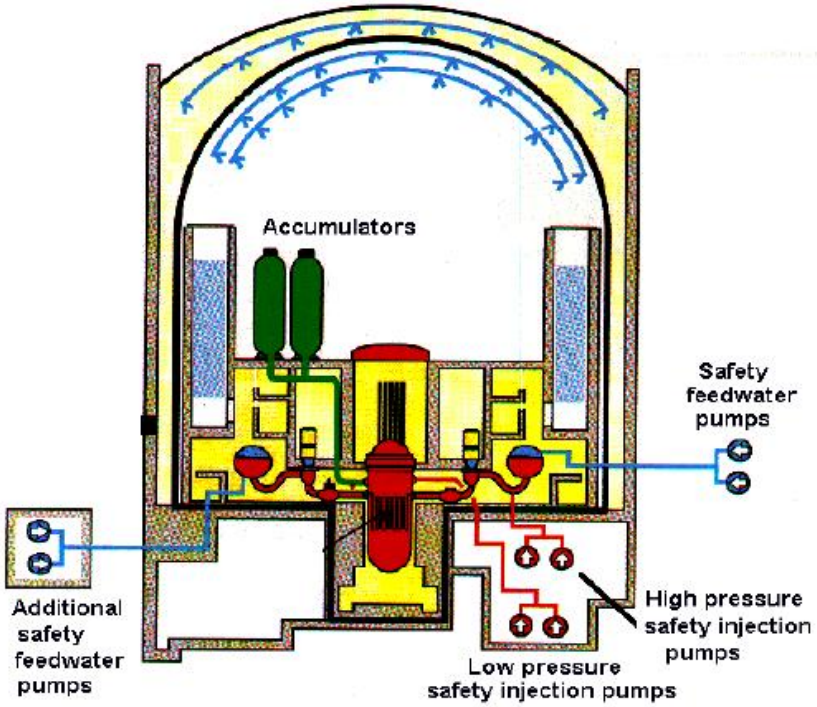
- Una vez que se han dañado los elementos combustibles, se produce la liberación de productos de fisión al refrigerante, lo que conlleva un aumento de los niveles de radiación en el circuito primario y en sus inmediaciones.

DETECCIÓN DE DAÑOS EN EL NÚCLEO (4)

- El aumento de actividad se puede conocer mediante la toma de muestras.
- Los daños en el combustible pueden implicar la oxidación del revestimiento de la varilla de combustible, lo cual produce la formación de hidrógeno, con riesgo de explosión.

DETECCIÓN DE FUGAS EN LA CONTENCIÓN (1)

- El **edificio de contención** se instala en las centrales con el fin de retener los productos radiactivos que se pueden liberar en caso de accidente.



DETECCIÓN DE FUGAS EN LA CONTENCIÓN (2)

DETECCIÓN DE FUGAS EN LA CONTENCIÓN (3)

- Se diseña considerando un LOCA que resista una presión mayor que la que se produciría como consecuencia de la liberación completa de la masa y la energía existente en el circuito de refrigeración.

- Deberá garantizar que el escape de material radiactivo no producirá efectos en el exterior superiores a los niveles de referencia establecidos.

DETECCIÓN DE FUGAS EN LA CONTENCIÓN (4)

- Existen válvulas de aislamiento para garantizar la estanqueidad de la conexión.
- Las fugas de contención también pueden producirse por el deterioro o imperfecciones en el aislamiento de las penetraciones o en los propios muros de contención.
- Los fallos en la frontera de contención pueden pasar desapercibidos cuando las condiciones a lo largo de la frontera sean homogéneas.

DETECCIÓN DE FUGAS EN LA CONTENCIÓN (5)

- Las fugas existentes pueden ser detectadas, por ejemplo, a través de aumentos de presión, temperatura, humedad o corrientes en los compartimentos de contención o fuera de ella.

- La forma más fiable y exacta para la detección de fugas en contención es a través de las medidas de los niveles de radiación y de actividad de radionucleidos liberados durante el accidente.

DETECCIÓN DE FUGAS EN LA CONTENCIÓN (6)

- La información más fiable y precisa acerca del valor de tasa de fuga se obtiene de los monitores de radiación en los sistemas de ventilación.

MÓDULO 6: EVALUACIÓN DE ACCIDENTES

6.2 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LA PLANTA DURANTE LAS EMERGENCIAS

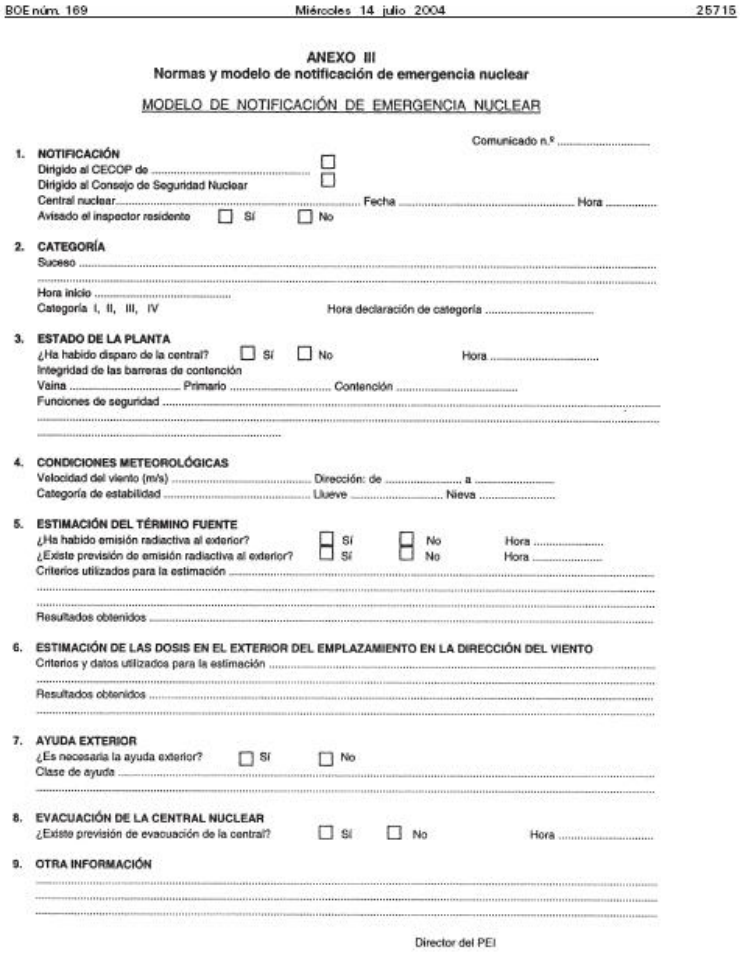
GENERALIDADES

- En caso de accidente nuclear se activan tanto el PEI como el PLABEN.
- En la planificación fuera del emplazamiento (PLABEN) se distinguen dos fases:
  - **Fase de emergencia**: periodo comprendido entre la declaración de la ocurrencia del accidente y su declaración final.
  - **Fase de recuperación**: se inicia cuando se ha declarado el final de la fase de emergencia, y comprende las actuaciones encaminadas a recuperar la condiciones normales.

TRANSFERENCIA DE DATOS DESDE LA PLANTA (1)

- La preparación de la emergencia fuera del emplazamiento depende en gran medida de la **información que se recibe desde la planta**
- Impreso común para todas las CCNNEE: **Anexo III** del PLABEN

TRANSFERENCIA DE DATOS DESDE LA PLANTA (2)



BOE núm. 169 Miércoles 14 julio 2004 25715

ANEXO III
Normas y modelo de notificación de emergencia nuclear

MODELO DE NOTIFICACIÓN DE EMERGENCIA NUCLEAR

Comunicado n.º .....

1. **NOTIFICACIÓN**
Dirigido al CECOP de ..... ☐
Dirigido al Consejo de Seguridad Nuclear ☐
Central nuclear ..... Fecha ..... Hora .....
Avisado el inspector residente ☐ Sí ☐ No

2. **CATEGORÍA**
Suceso .....
.....
Hora inicio .....
Categoría I, II, III, IV Hora declaración de categoría .....

3. **ESTADO DE LA PLANTA**
¿Ha habido disparo de la central? ☐ Sí ☐ No Hora .....
Integridad de las barreras de contención
Vaina ..... Primario ..... Contención .....
Funciones de seguridad .....
.....
.....

4. **CONDICIONES METEOROLÓGICAS**
Velocidad del viento (m/s) ..... Dirección: de ..... a .....
Categoría de estabilidad ..... Llueve ..... Nieva .....

5. **ESTIMACIÓN DEL TÉRMINO FUENTE**
¿Ha habido emisión radiactiva al exterior? ☐ Sí ☐ No Hora .....
¿Existe previsión de emisión radiactiva al exterior? ☐ Sí ☐ No Hora .....
Criterios utilizados para la estimación .....
.....
.....
Resultados obtenidos .....

6. **ESTIMACIÓN DE LAS DOSIS EN EL EXTERIOR DEL EMPLAZAMIENTO EN LA DIRECCIÓN DEL VIENTO**
Criterios y datos utilizados para la estimación .....
.....
Resultados obtenidos .....
.....

7. **AYUDA EXTERIOR**
¿Es necesaria la ayuda exterior? ☐ Sí ☐ No
Clase de ayuda .....
.....

8. **EVACUACIÓN DE LA CENTRAL NUCLEAR**
¿Existe previsión de evacuación de la central? ☐ Sí ☐ No Hora .....

9. **OTRA INFORMACIÓN**
.....
.....
.....

Director del PEI

Anexo III del PLABEN

Modelo de notificación de emergencia nuclear.

TRANSFERENCIA DE DATOS DESDE LA PLANTA (3)

- Primer comunicado: prima celeridad (< 30 min) vs. detalle
- Posteriormente, conforme se disponga de datos adicionales de interés y/o se modifiquen los anteriores
- Los datos se transmiten desde la SdC al CAT (dentro de la instalación), y del CAT a los Organismos Oficiales (CECOP y la SALEM) y al CAE (fuera de la instalación)

RECOPILACIÓN DE DATOS DE PLANTA (1)

- Se vigilarán las condiciones de los ESC de Seguridad
- Se realizarán mediciones y/o estimaciones de las condiciones radiológicas y de los vertidos radiactivos al exterior (potenciales o reales)
- Parámetros para la evaluación de vertidos al exterior:
  - Datos de la estación meteorológica.
  - Toma de muestras de aire.
  - Toma de muestras de contaminación superficial.
  - Inspecciones y medidas de los niveles de radiación en distintas áreas.
  - Análisis de vertidos líquidos y gaseosos.

RECOPILACIÓN DE DATOS DE PLANTA (2)

- Una vez declarada la emergencia y recibida toda la información procedente de la central nuclear, el Director del PEN realizará las siguientes acciones:
  - Declarar la fase y la situación de emergencia que corresponda según las características del accidente y de las condiciones existentes.
  - Decidir y ordenar las medidas a aplicar en cada una de las situaciones.
  - Determinar y coordinar la información al público.

RECOPILACIÓN DE DATOS DE PLANTA (3)

- Para minimizar los retrasos y pérdidas en la recopilación de datos el CECOP constituye un Equipo de Evaluación.

- El control y seguimiento de los flujos de comunicación entre los distintos centros de coordinación operativa corresponde al Grupo de Coordinación y Asistencia Técnica, que además será la célula de gestión del PEN.

MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ANTES DE DAÑOS AL NÚCLEO (1)

- La primera tarea es analizar los daños al núcleo y al RCS.
- Cuando se confirmen los daños al núcleo, se prosigue con el análisis del resto de ESC de Seguridad y de Contención:
  - sistemas en operación
  - sistemas fallados y modos de fallo
  - ¿pueden los sistemas que fallados ser sustituidos o recuperados?
  - ¿pueden los daños propagarse a los sistemas en funcionamiento o disponibles?
  - si esto ocurre, ¿de cuánto tiempo se disponible antes de que se dañe el núcleo?
  - ¿los datos disponibles son fiables y completamente coherentes con el estado de la instalación?

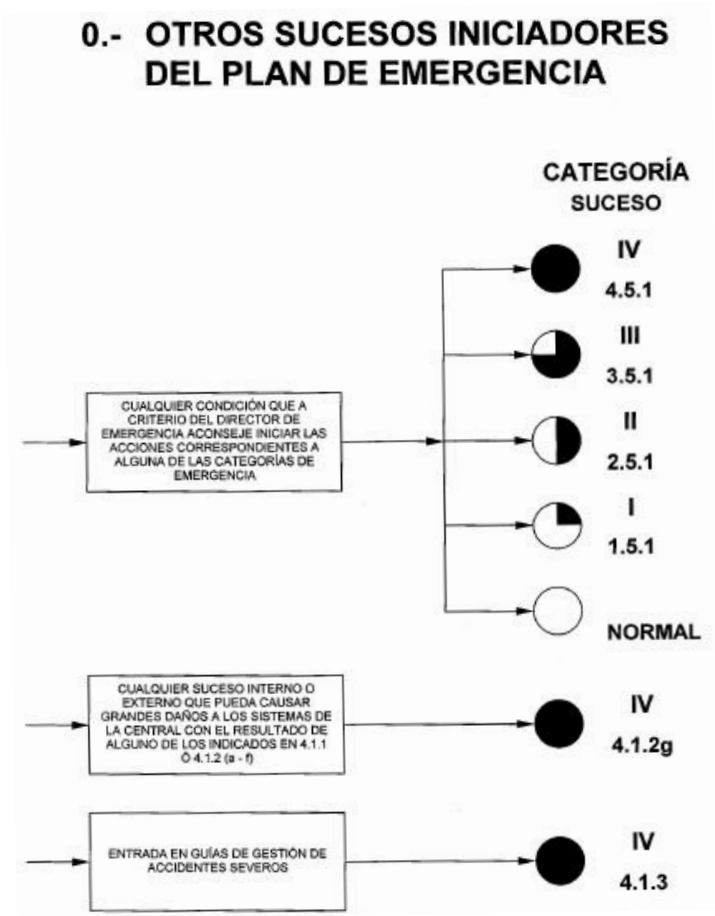
MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ANTES DE DAÑOS AL NÚCLEO (2)

- La AEX de una central nuclear requiere que el titular de la instalación presente al Organismo Regulador un Análisis de Accidentes (incluido en el EFS, documento “de primer nivel”), basado en el **Análisis Probabilístico de Seguridad** (APS), que contempla tres niveles:
  - NIVEL I: estudio de fiabilidad de sistemas.
  - NIVEL II: estimación del término fuente.
  - NIVEL III: análisis de consecuencias.
- Para realizar el análisis se agrupan los accidentes que tienen características similares y de cada uno de ellos se analiza el que tiene peores consecuencias externas.

MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ANTES DE DAÑOS AL NÚCLEO (3)

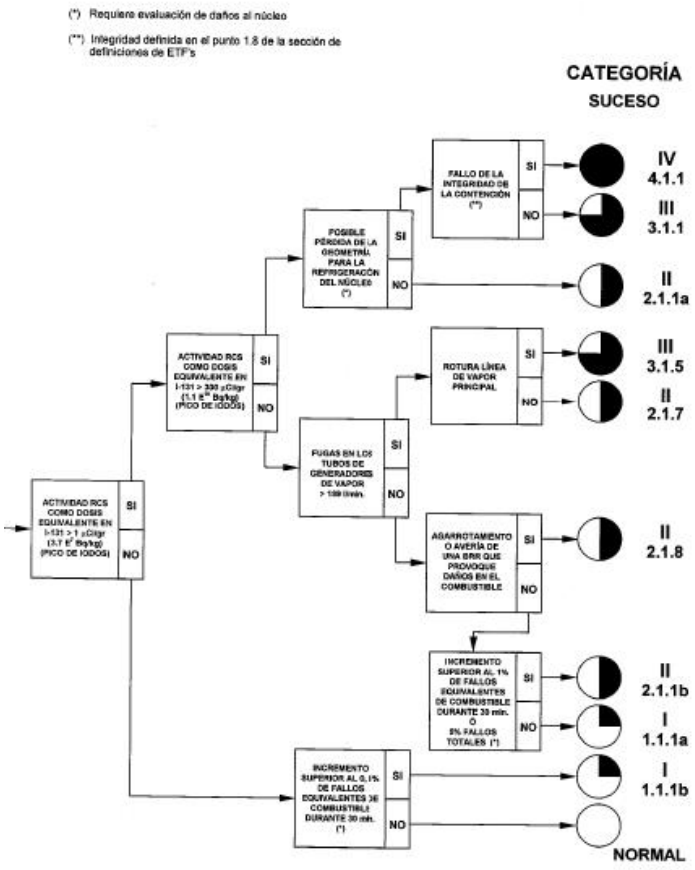
Árbol de sucesos

Cualquier suceso que pueda tener consecuencias importantes en el funcionamiento de la central, se analiza en detalle la respuesta esperable de los diferentes sistemas de la central y de esta en su conjunto.

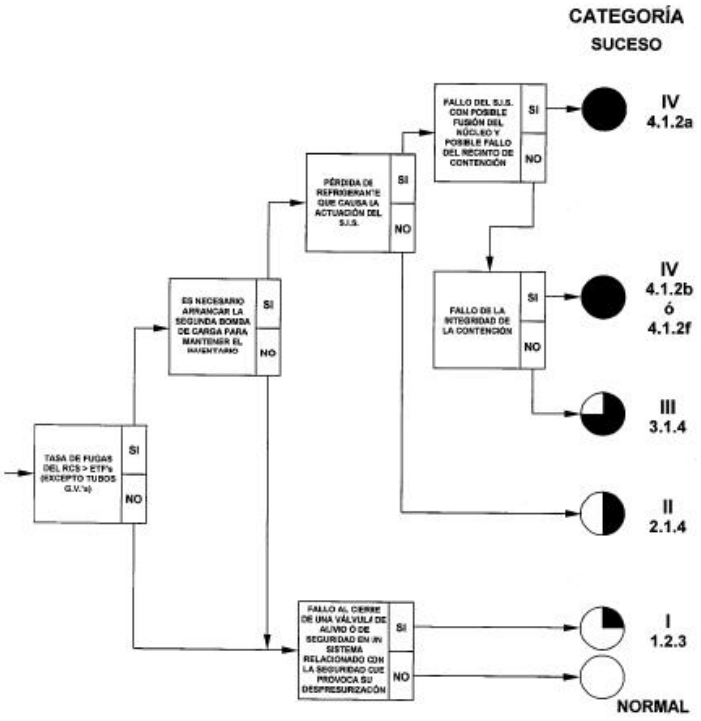


MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ANTES DE DAÑOS AL NÚCLEO (4)

1.- FALLOS DE COMBUSTIBLE

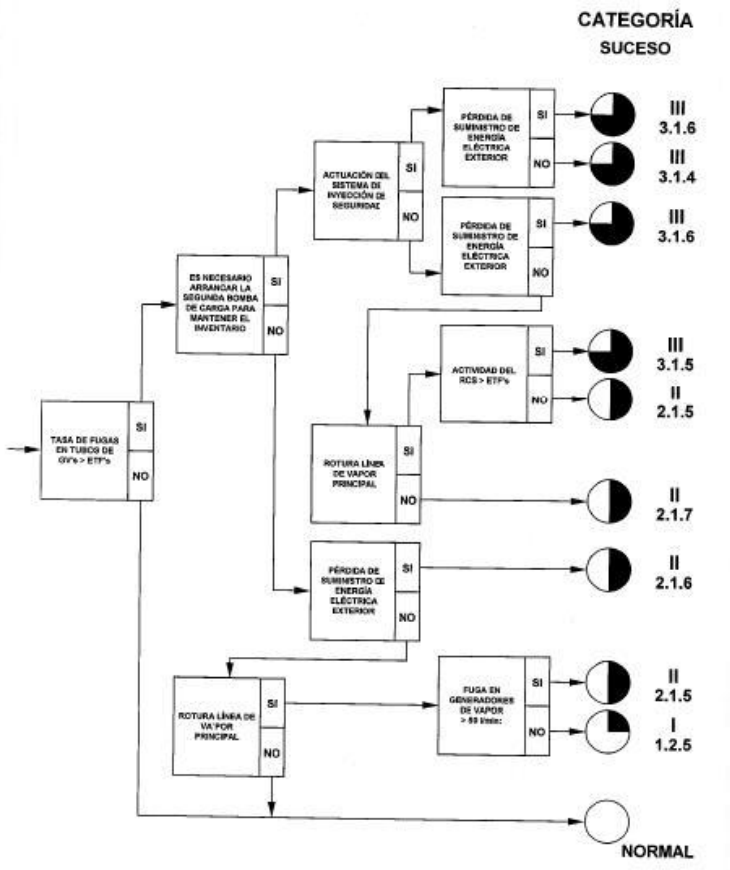


2.- FALLOS EN EL R.C.S.

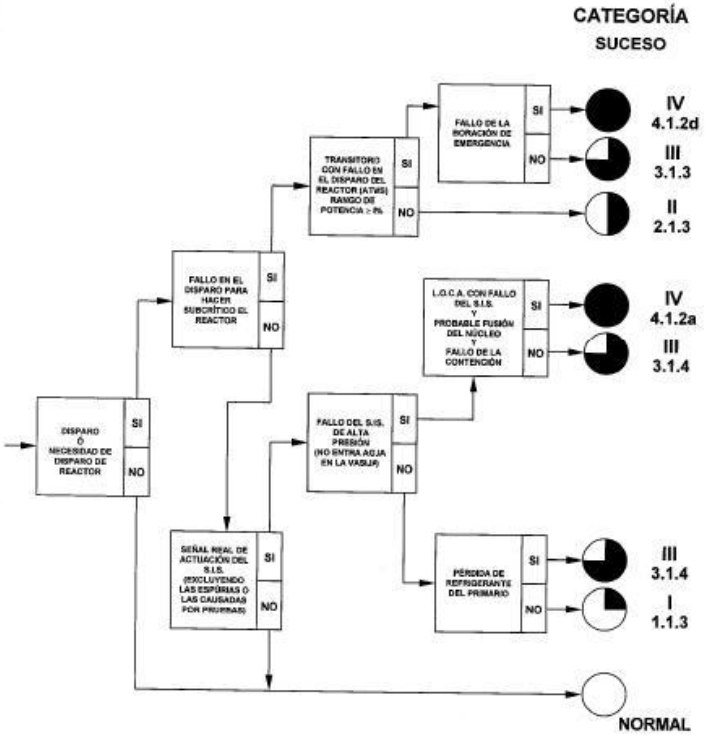


MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ANTES DE DAÑOS AL NÚCLEO (5)

3.- FALLOS EN TUBOS GENERADOR DE VAPOR



4.- ACTUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN DEL REACTOR E INYECCIÓN DE SEGURIDAD



MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DESPUÉS DE DAÑOS AL NÚCLEO (1)

- La tarea principal es la estimación del momento y magnitud de la posible emisión.
- Una vez que ha pasado la fase activa de un accidente, la cuestiones a tener en cuenta son:
  - ¿Está el núcleo refrigerado o se ha recuperado completamente la capacidad de refrigeración?
  - ¿Existe algún riesgo de fallo para la vasija debido a la fusión por explosiones de vapor, explosiones de hidrógeno, o algún otro evento energético?
  - ¿Están las temperaturas y presiones del RCS y de contención controladas y se mantienen estables?
  - ¿Cuáles son las vías potenciales de salida inminente de GN y iodos?
  - ¿Ha sido detectada alguna fuga de Contención?
  - ¿Qué se puede hacer para limitar la liberación potencial o real de las emisiones?

MÉTODO Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DESPUÉS DE DAÑOS AL NÚCLEO (2)

- El nivel de daños en el núcleo pueden ser estimados de manera aproximada basándose en el nivel de agua, caudal de refrigeración y temperatura del circuito primario
- Como método alternativo se puede utilizar el SVR de Contención y/o la [H_2] en Rx
- La inminente liberación potencial de gases nobles y yodos puede ser estimada basándose en los monitores de radiación en Contención y/o en Sistemas de ventilación.

CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EMERGENCIA (1)

- Se consideran medidas de protección las encaminadas a evitar o atenuar las consecuencias inmediatas y diferidas sobre la salud de la población afectada y del personal de intervención
- Información básica necesaria para la toma de decisiones
  - Situación de los ESC de la instalación
  - Datos radiológicos (SVR/vigilancias “in situ”/estimaciones)
  - Datos meteorológicos

CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EMERGENCIA (2)

- **Medidas urgentes**
  - Confinamiento
  - Profilaxis radiológica
  - Evacuación
  - Complementarias: control de accesos, autoprotección, estabulación de animales, descontaminación de personas
- **Medidas diferidas**
  - Control de alimentos y agua
  - Descontaminación de áreas
  - Traslado temporal y traslado permanente