



Introducción a la Seguridad Nuclear

Seminario de Reactores Avanzados
ETSII (UPM) Web Version

Alfonso Barbas Espa

Introducción: Enunciado del problema

- Objetivo según el OIEA (INSAG-12):

“Proteger a los individuos, a la sociedad y al medio ambiente estableciendo y manteniendo en las centrales nucleares una defensa efectiva contra los riesgos radiológicos”

Introducción: Índice

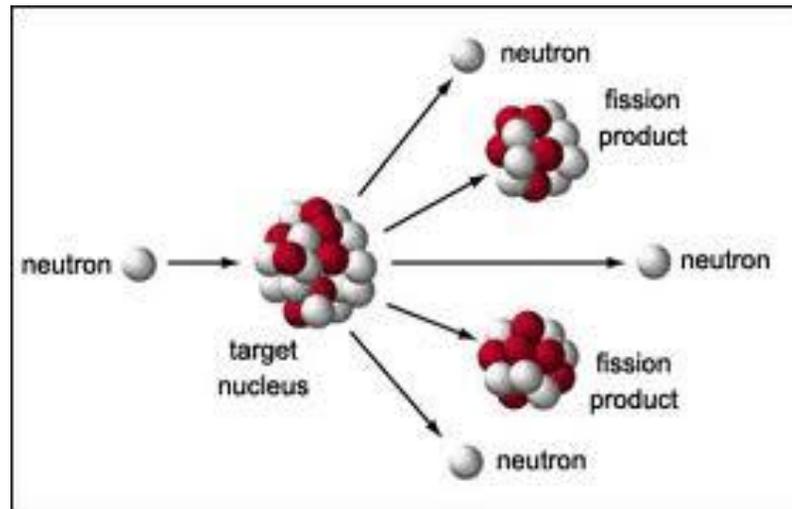
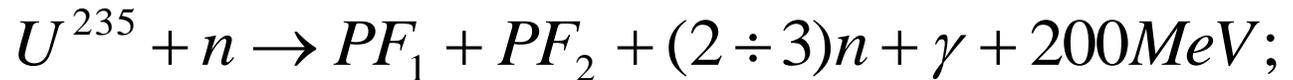
- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

Introducción: Índice

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

¿De qué me protejo?: Productos de fisión

Los productos de fisión provienen de la fisión nuclear:

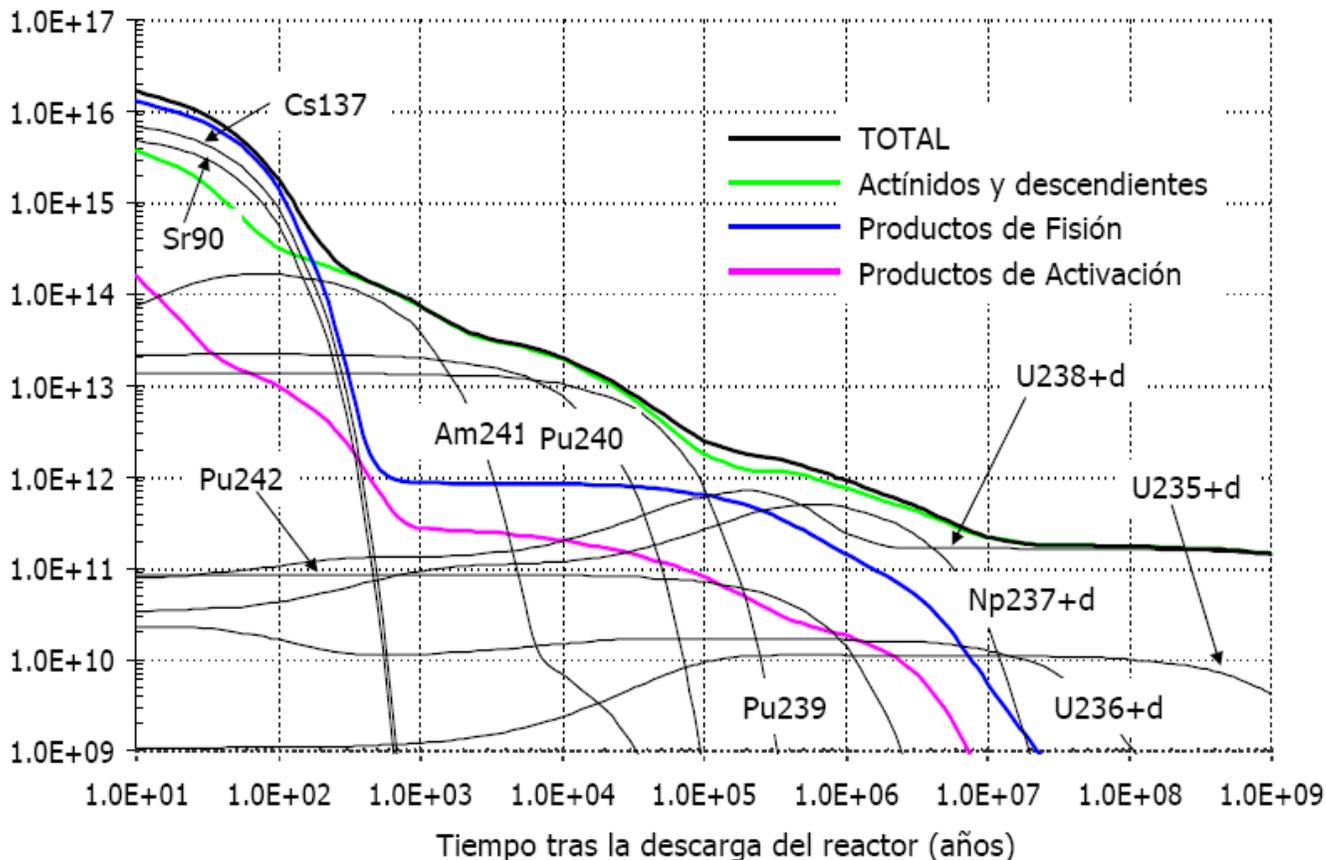


Isótopo	Periodo	Actividad (Ci/tU)
Kr ⁸⁵	10,8 a	1,13e4
H ³	12,3 a	7,09e2
Xe ¹³³	5,3 d	1,61e6

¿De qué me protejo?: Activación del combustible

Los transuránidos suponen el mayor problema en el contexto de los RAA.

Actividad en el combustible para un quemado de 40GWd/tU



¿De qué me protejo?: Activación del refrigerante

- Se puede producir por la presencia de protones (de la disociación del agua).
- Se puede producir a partir de gases disueltos, o el boro (en PWR).
- Tiene importancia radiológica (en BWR especialmente), ya que recorre todo el primario.

Reacción	Periodo	Tipo de emisor	Energía emitida
$O^{16}(n,p)N^{16}$	7,11 s	β^- , γ	10,4 MeV
$N^{14}(n,p)C^{14}$	5370 a	β^-	160keV
$D(n,\gamma)T$	12,33 a	β^-	20keV

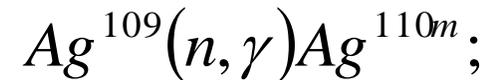
¿De qué me protejo?: Activación de materiales

La importancia de estos productos aparece sobretodo en recargas y desmantelamientos, donde supone una importante fuente de dosis para los operarios

Mat. Estructurales:



Mat. de control:



Mat. de las vainas:



Introducción: Índice

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

¿Cómo sabré...?: Concepto de Seguridad II

Riesgo calculado

$$R = \sum_i pE_i cE_i;$$

Aproximación Determinista

basada en:

cE_i ➤ Consecuencias del escenario accidental

Aproximación Probabilista

basada en:

pE_i ➤ Probabilidad del escenario accidental

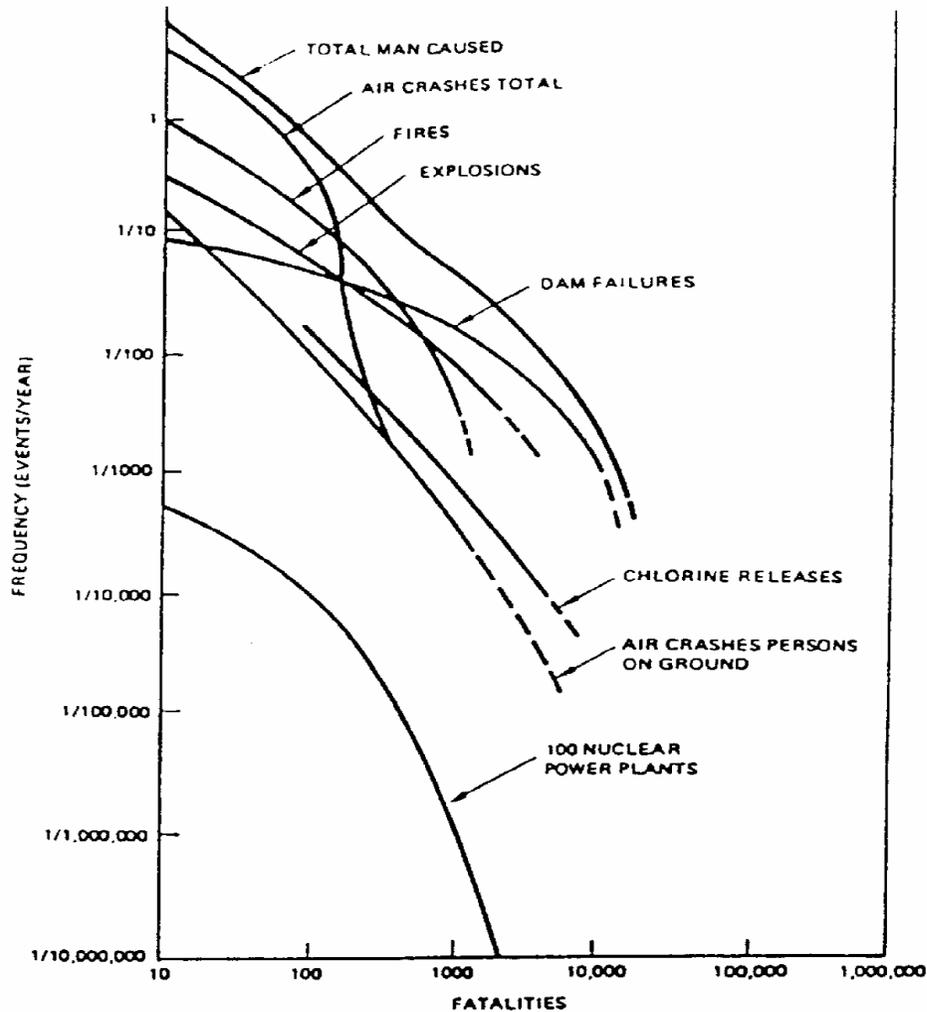
¿Cómo sabré...?: Concepto de Seguridad III

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Daño}$$

Algunos ejemplos:

	Riesgo de muerte / individuo y daño
Accidente cualquier tipo	1 en 1.600
Automóvil	1 en 4.000
Incendio o quemadura	1 en 25.000
Ahogado	1 en 30.000
Electrocutado	1 en 160.000
Rayo	1 en 2.500.000
Accidente nuclear	1 en 5.000.000.000

¿Cómo sabré...?: Concepto de Seguridad IV



Frecuencia anual vs consecuencias de diferentes accidentes

¿Cómo sabré...?: Aproximación Determinista I

- EEUU – 1957: no se puede estimar las probabilidades
- El peor accidente postulado tiene probabilidad de aparición igual a 1 $\Rightarrow R = \sum_i cE_i$;
- Diseñamos la central con el fin de mitigar las consecuencias y hacer el daño tolerable
- Bases de diseño de la instalación



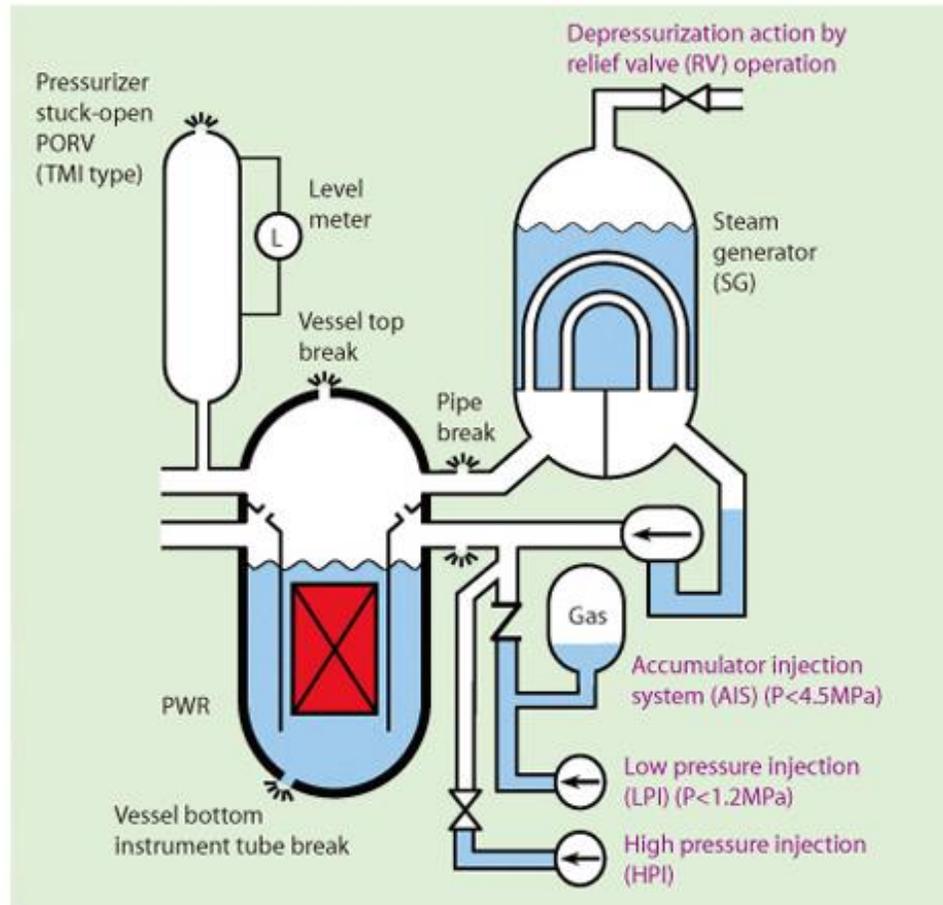
¿Cómo sabré...?: Aproximación Determinista II

Seguridad a ultranza (seguridad con profundidad)

Niveles	Objetivo	Medios
Nivel 1	Prevención de fallos y comportamientos normales	Diseños redundantes y conservadores, elevada calidad en la construcción
Nivel 2	Detección de fallos y control del funcionamiento anormal	Inclusión de sistemas de control, protección y vigilancia diseñados de acuerdo con criterios de seguridad
Nivel 3	Control de los accidentes base de proyecto	Incorporación de salvaguardias tecnológicas y procedimientos de operación de emergencia diseñados con criterios de seguridad
Nivel 4	Control de los accidentes graves que superen las bases de proyecto	Adición de salvaguardias tecnológicas específicas y previsión de la gestión integral de los accidentes graves
Nivel 5	Mitigación de las consecuencias radiológicas de los escapes radiactivos	Establecimiento de un plan de emergencia radiológica de acuerdo con criterios de protección universales

¿Cómo sabré...?: Aproximación Determinista III

Accidente base de diseño: LOCA



¿Cómo sabré...?: Aproximación Probabilista I

- EEUU – 1975: Reactor Safety Study
- No es muy seguido hasta el accidente de TMI-II (1979)
- Tres niveles
 - Escenarios Accidentales. Estimación de probabilidades
 - Fenómenos físicos asociados: término fuente
 - Estimación de las consecuencias y cálculo del riesgo



¿Cómo sabré...?: Aproximación Probabilista II

Análisis probabilista de seguridad



¿Cómo sabré...?: Aproximación Probabilista III

Análisis probabilista de seguridad

AMANECER	DESPERTADOR	LLAMADA TELEFÓNICA	COCHE	ASCENSOR	ESCALERAS	SECUENCIA	PROFESOR EN CLASE
I	A	B	C	D	E		
						I	SI
						ID	SI
						IDE	O
						IC	NO
						IA	SI
						IAD	SI
						IADE	NO
						IAC	NO
						IAB	NO
EL PROFESOR NO LLEGA A CLASE							

ÁRBOL DE EVENTOS

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

¿Cómo me protejo?: Criterios del emplazamiento I

- **Parámetros de importancia**
 - Típicos de la industria convencional
 - Seguridad de la instalación
 - Impacto radiológico de la instalación
 - Medio ambiente
 - Naturaleza social



¿Cómo me protejo?: Criterios del emplazamiento II

- **Típicos de la industria convencional**
 - Demanda energética, potencia nominal.
 - Cercanía a la red eléctrica
 - Disponibilidad de la mano de obra
 - Disponibilidad de foco frío



¿Cómo me protejo?: Criterios del emplazamiento III

- **Seguridad de la instalación**
 - Condiciones meteorológicas extremas (huracanes, tornados...)
 - Condiciones hidrológicas extremas (inundaciones, tsunamis...)
 - Condiciones geológicas extremas (terremotos)
 - Impacto de aviones
 - Conflictos armados



¿Cómo me protejo?: Criterios del emplazamiento IV

- **Impacto radiológico de la instalación**
- Características meteorológicas e hidráulicas que afectan a la dispersión y retención de los contaminantes
- Cercanía de la población
- Viabilidad de los planes de emergencias



¿Cómo me protejo?: Criterios del emplazamiento V

➤ Medio ambiente

- Impacto químico en el aire
- Impacto térmico sobre el foco frío
- Impacto visual y sonoro
- Impacto social y económico

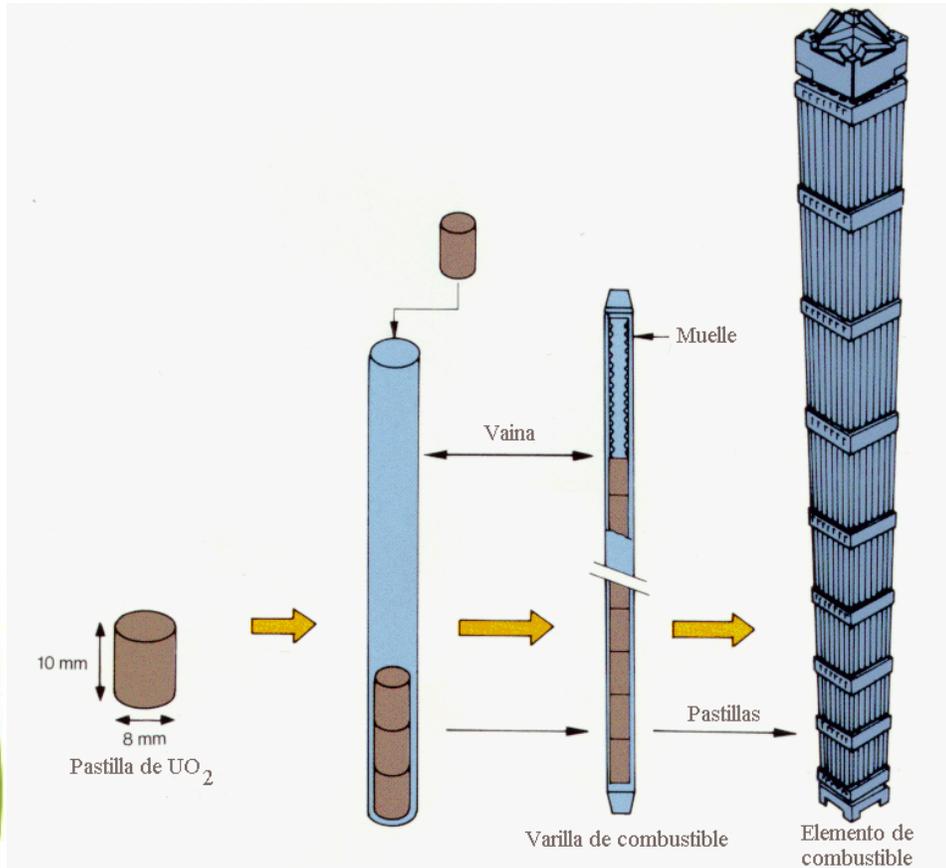


¿Cómo me protejo?: Criterios de diseño I

- **Funciones fundamentales del diseño**
 - Control de la potencia del reactor (con el fin de evitar accidentes de reactividad)
 - Refrigeración de los elementos combustibles
 - Confinamiento de los productos radiactivos en el interior del núcleo

¿Cómo me protejo?: Criterios de diseño II

➤ Control de la potencia del reactor



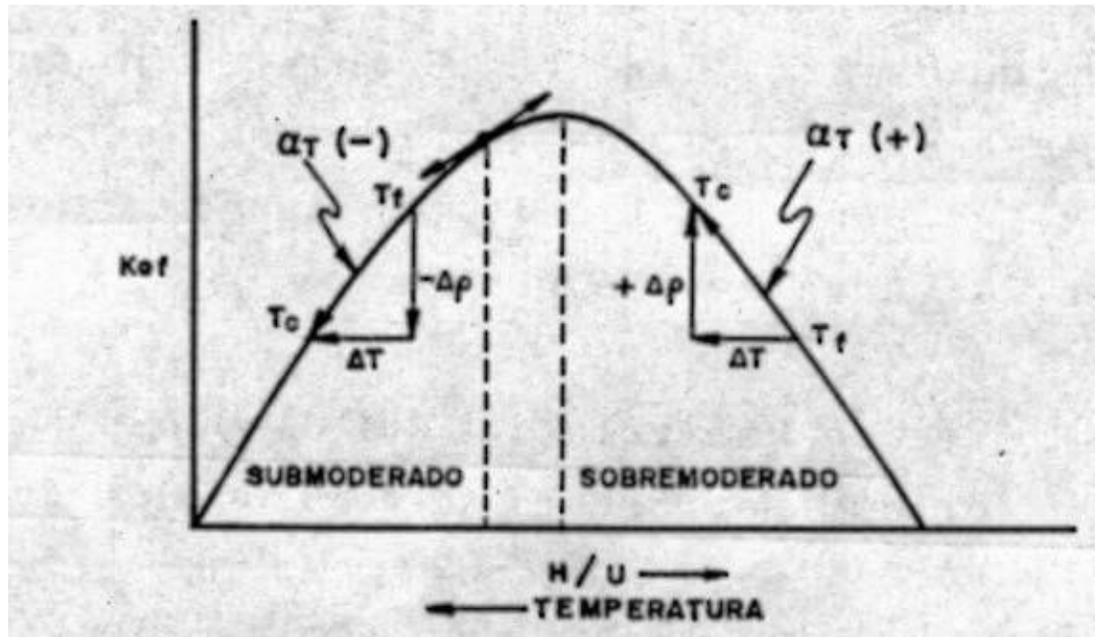
Combustible nuevo:
95.5% U-238
4.5% **U-235**

Combustible MOX:
92% U-238
8% **Pu-239**

Combustible gastado:
93% U-238
1% **U-235**
1% **Pu**
5% Productos Fisión

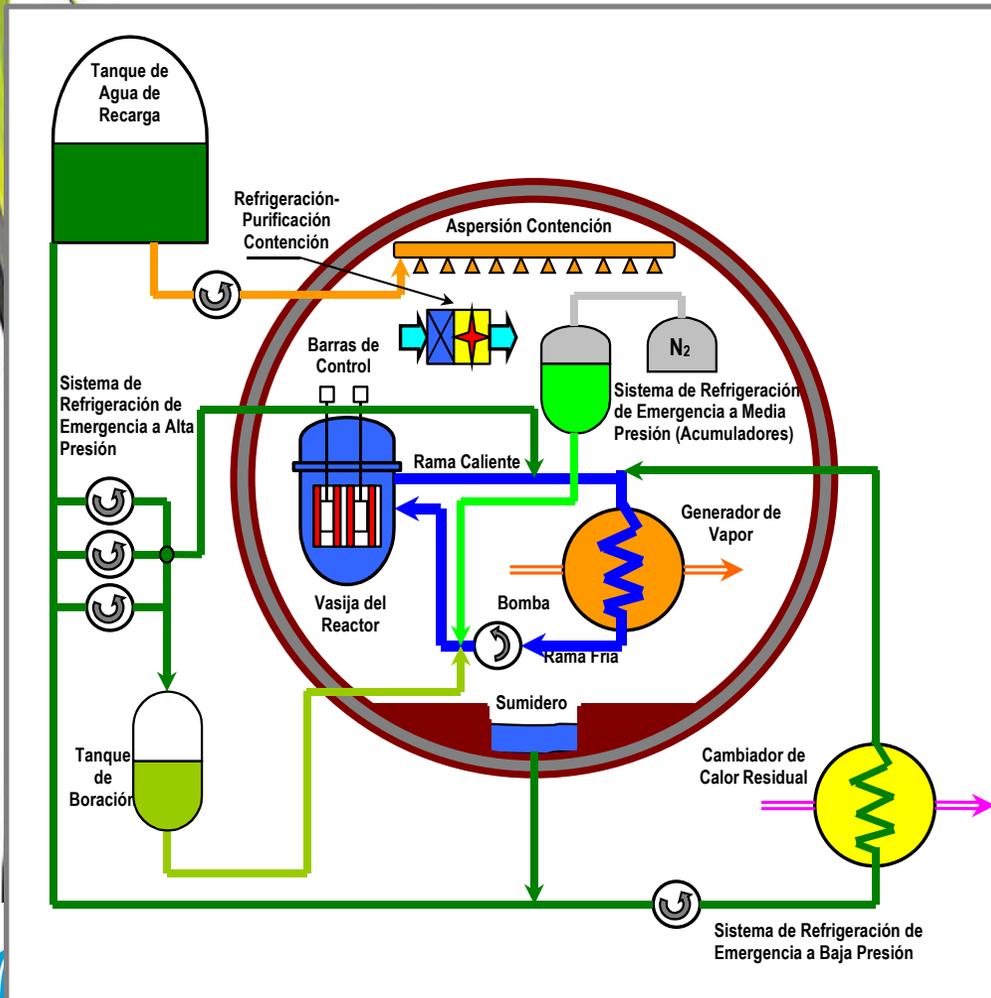
¿Cómo me protejo?: Criterios de diseño III

- **Control de la potencia del reactor**
 - Coeficientes de reactividad
 - *Coeficiente de temperatura del combustible*
 - *Coeficiente de temperatura del moderador*



¿Cómo me protejo?: Criterios de diseño IV

➤ Refrigeración de los elementos combustibles



➤ Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo del Reactor: Con tres subsistemas:

- Alta Presión, con inyección de boro suficiente para asegurar la parada del reactor.
- Presión Intermedia, con acumuladores de actuación pasiva que inyectan agua borada.
- Baja Presión, con cambiadores de calor para extraer el calor residual a largo plazo.

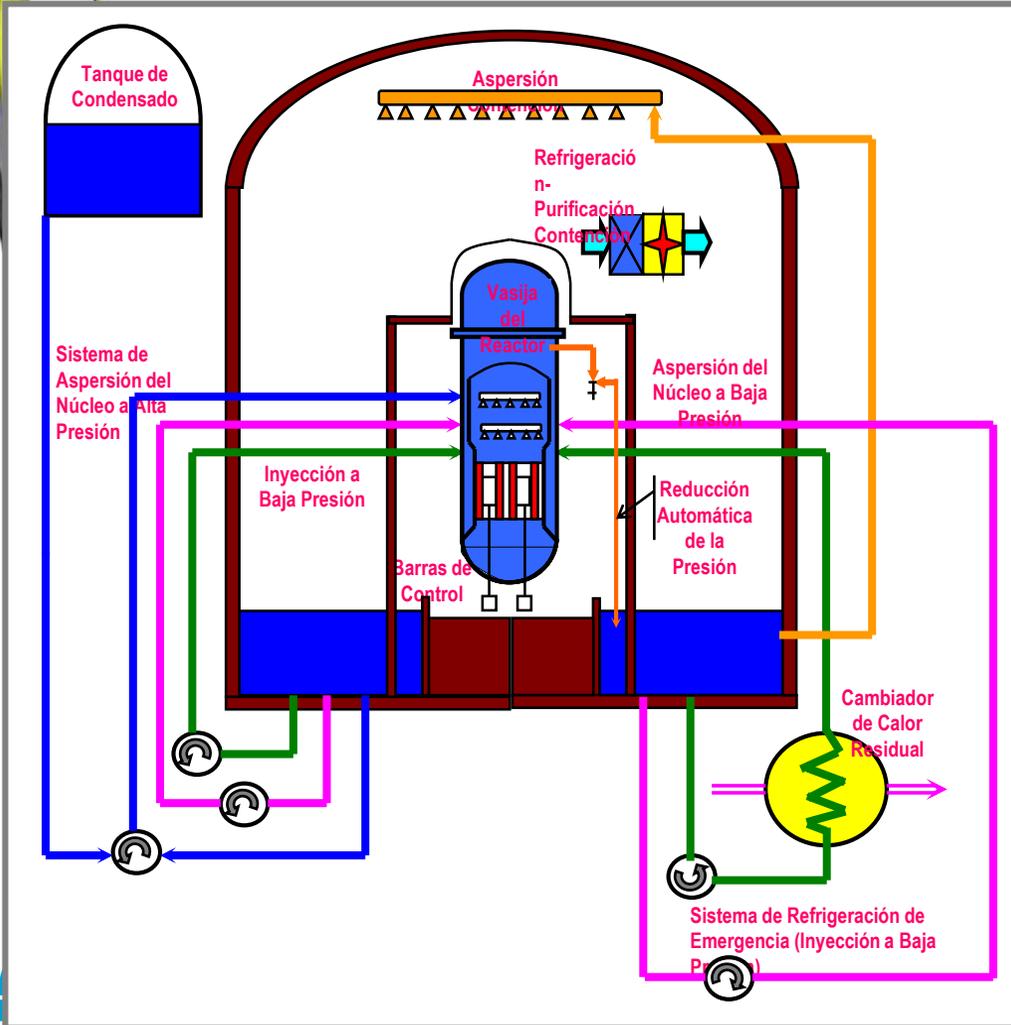
➤ Sistemas auxiliares de la Contención:

- Sistemas de limpieza y refrigeración
- Aspersión (refrigeradora y limpia)

PWR

¿Cómo me protejo?: Criterios de diseño V

➤ Refrigeración de los elementos combustibles



➤ Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo del Reactor:

- Aspersión del núcleo a alta presión
- Despresurización automática
- Aspersión del núcleo a baja presión
- Inyección de refrigerante a baja presión

➤ Sistemas auxiliares de la Contención:

- Sistemas de limpieza y refrigeración
- Aspersión (refrigera y limpia)

BWR

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

Introducción: Índice

- **¿De qué me protejo?**
- **¿Cómo sabré si estoy protegido?**
 - Concepto de seguridad
 - Análisis Determinista de Seguridad
 - Análisis Probabilista de Seguridad
- **¿Cómo me protejo?**
 - Criterios del emplazamiento
 - Criterios de diseño
- **¿Qué pasa en caso de accidente?**
 - Accidente severo: TMI-II
 - Accidente severo: Chernobyl
 - Accidente severo: Fukushima

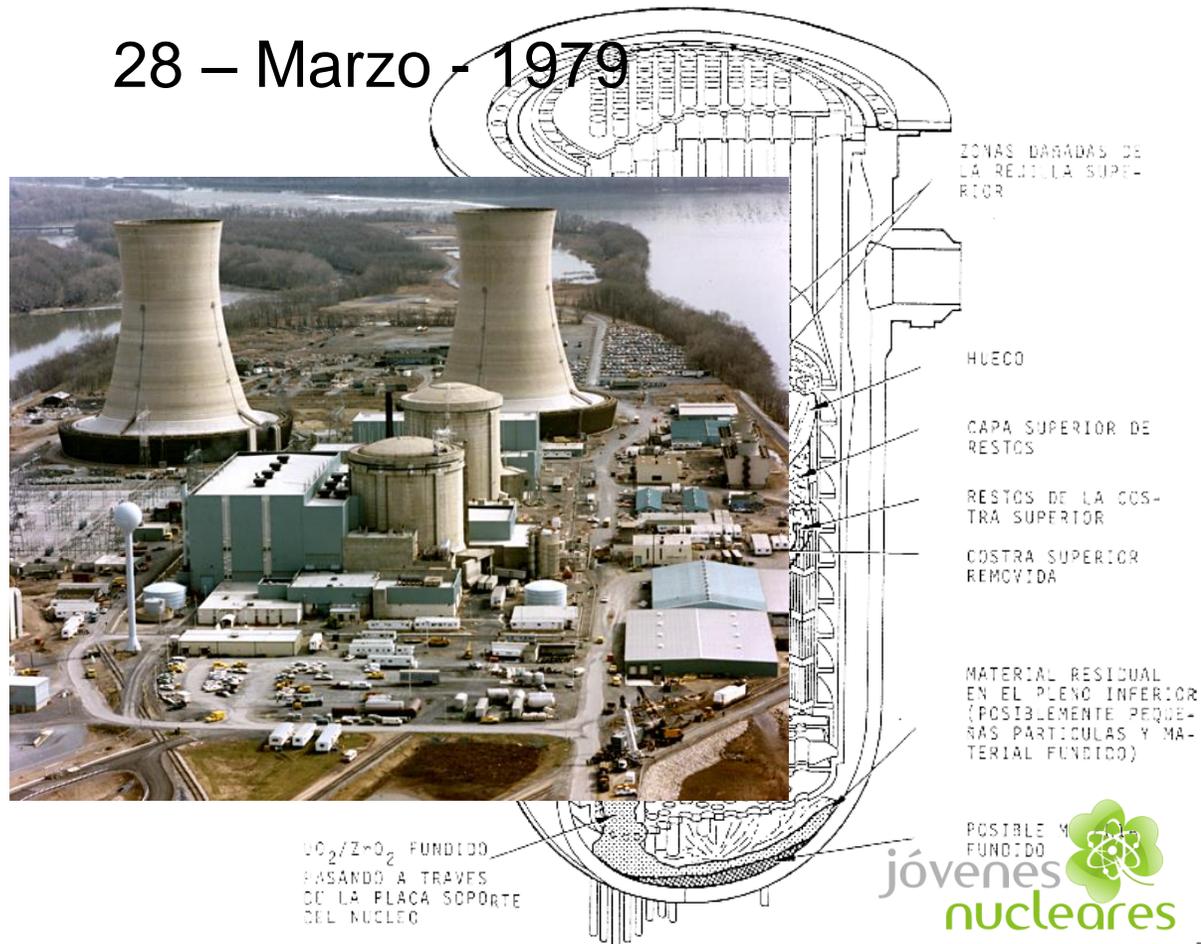
¿Qué pasa en caso ...?: Clasificación de accidentes I



¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de TMI-2

Three Mile Island – 2 (Pensilvania, EEUU)

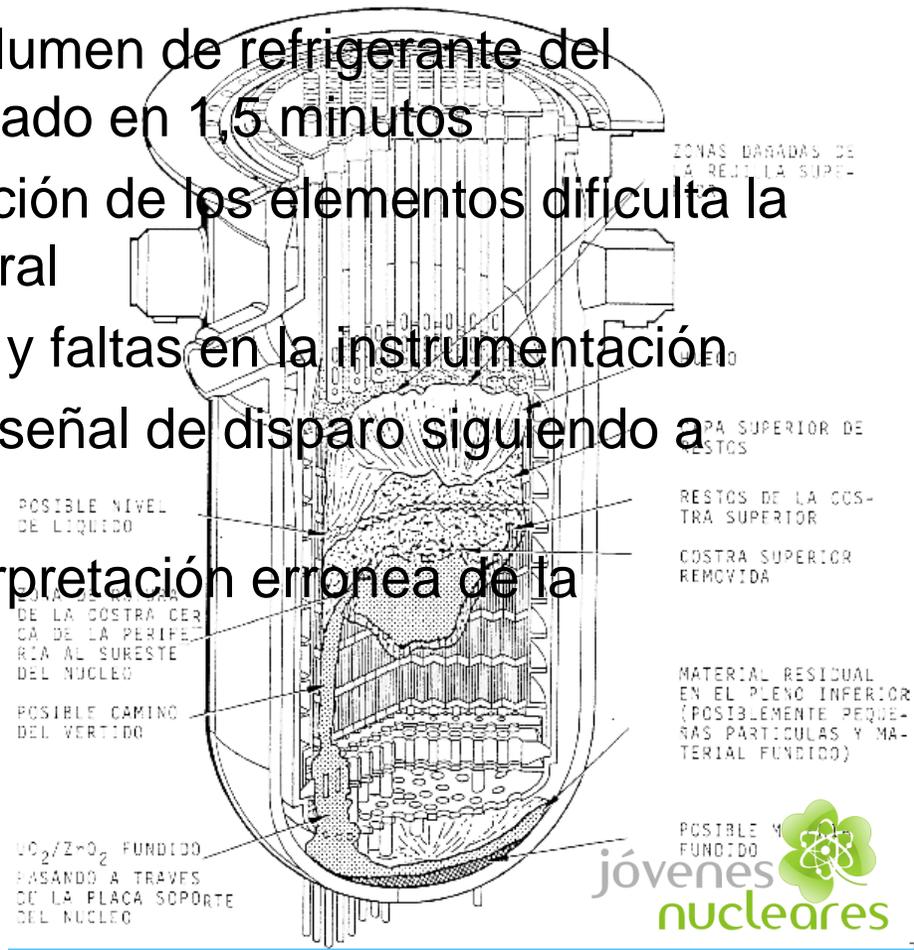
28 – Marzo - 1979



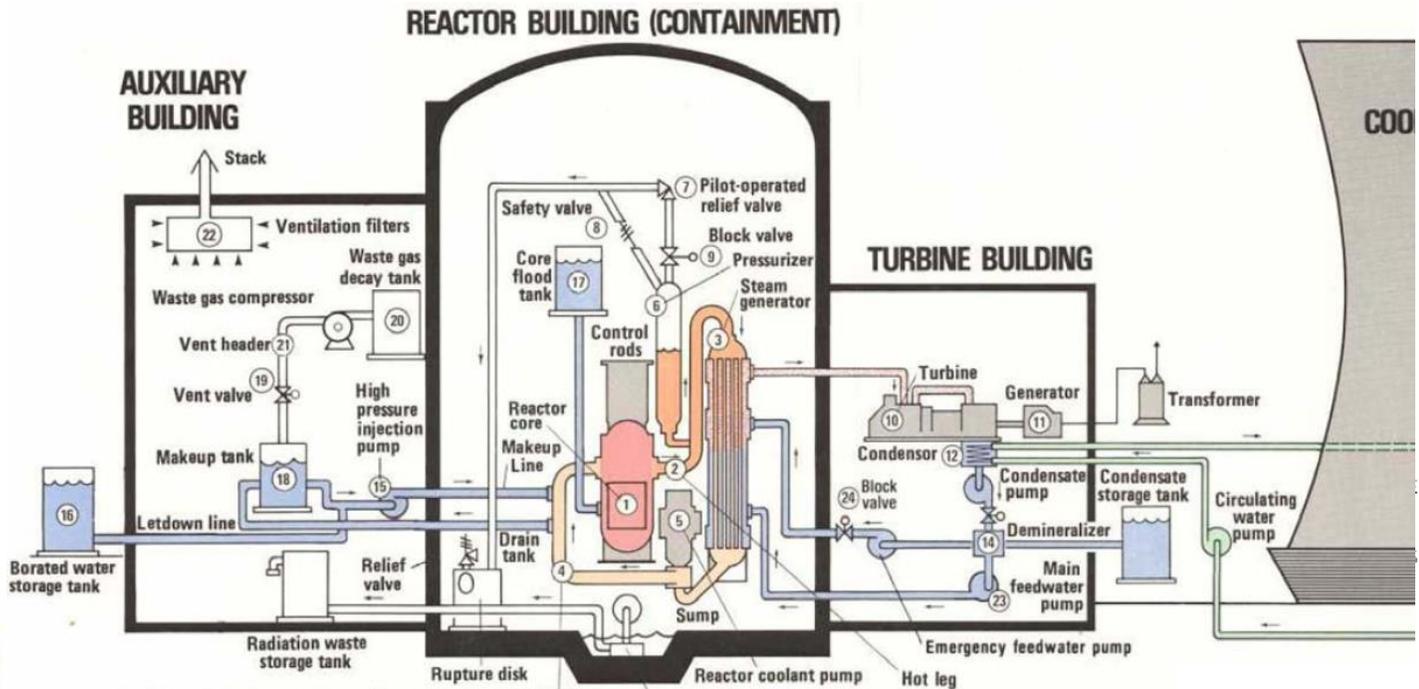
¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de TMI-2 I

➤ Causas del accidente

- Diseño: bajo volumen de refrigerante del secundario: secado en 1,5 minutos
- Diseño: disposición de los elementos dificulta la circulación natural
- Diseño: errores y faltas en la instrumentación
- Diseño: no hay señal de disparo siguiendo a turbina
- Operación: interpretación errónea de la situación.



¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de TMI-2 II



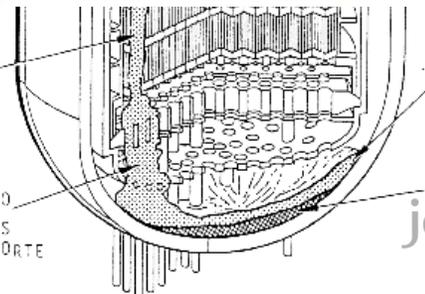
COLOR PLATE I. TMI 2 PLANT SCHEMATIC

Cold leg Sump pump

DEL NUCLEO

POSIBLE CAMINO DEL VERTIDO

CO₂/ZnO₂ FUNDIDO PASANDO A TRAVES DE LA PLACA SOPORTE DEL NUCLEO



MATERIAL RESIDUAL EN EL PLENO INFERIOR (POSIBLEMENTE PEQUEÑAS PARTÍCULAS Y MATERIAL FUNDIDO)

POSIBLE M FUNDIDO

¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de TMI-2 III

➤ Consecuencias del accidente

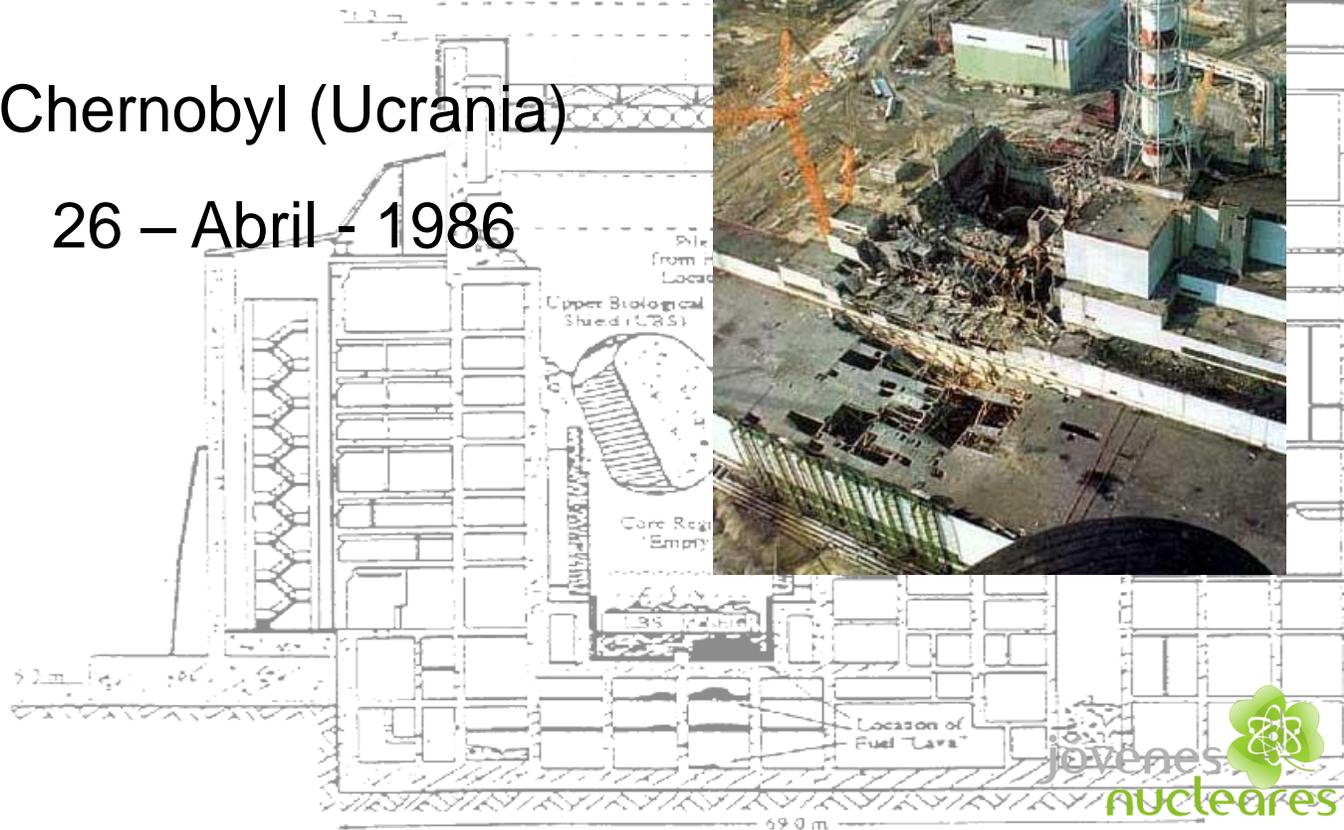
- Supuso la liberación controlada de importantes cantidades de radioisótopos
- Sin impacto radiológico apreciable para la población
- Entrenamiento de los operadores
- Utilización de APS
- Planificación de emergencias
- Intercambio de experiencia operativa
- Información sobre fusión de núcleo



¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Chernobyl

Chernobyl (Ucrania)

26 – Abril - 1986

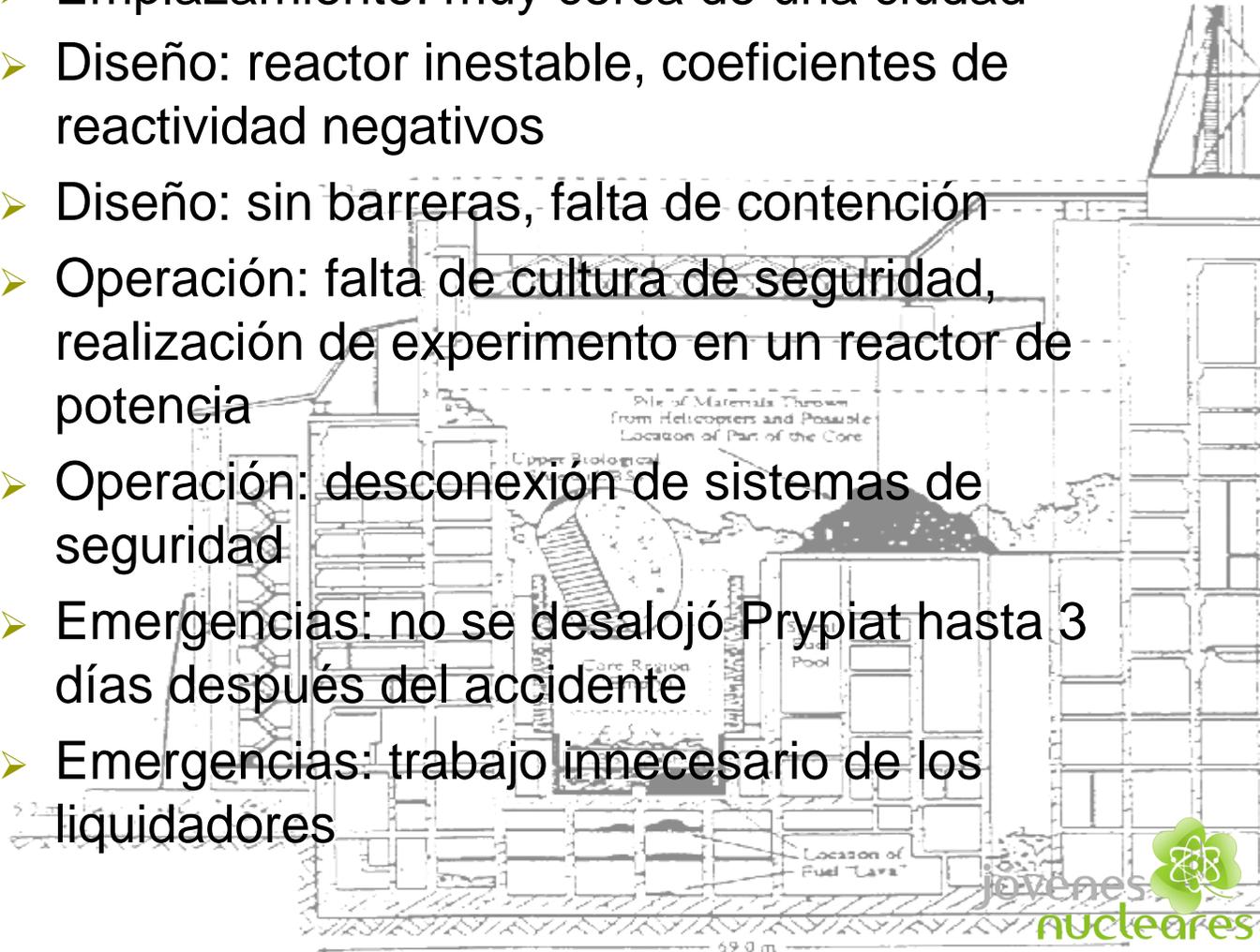


¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Chernobyl I

Potencia eléctrica	1000 MW	Presión de agua en los separadores	70 bar
Potencia térmica	3200 MW	Temperatura en la turbina	280°C
Altura activa	7 m	Presión de la turbina	65 bar
Diámetro del núcleo	11,8 m	Potencia de la turbina	500 MW(e)
Material combustible	UO ₂	factor de pico radial	1,48
Nº de canales de combustible	1661	Factor de pico axial	1,40
Enriquecimiento (w/o)	2	Coefficiente de huecos	+2,0E-4
Carga total de uranio	192 T	Coefficiente de temp. del combustible	-1,25E-5
Quemado de descarga	20,0 MWd/Kg	Coefficiente de temp. del grafito	+6,0E-5
Máxima potencia lineal	385 W/cm	Coefficiente de potencia (P _N)	-5,0E-7
Temperatura de salida del agua	284°C		

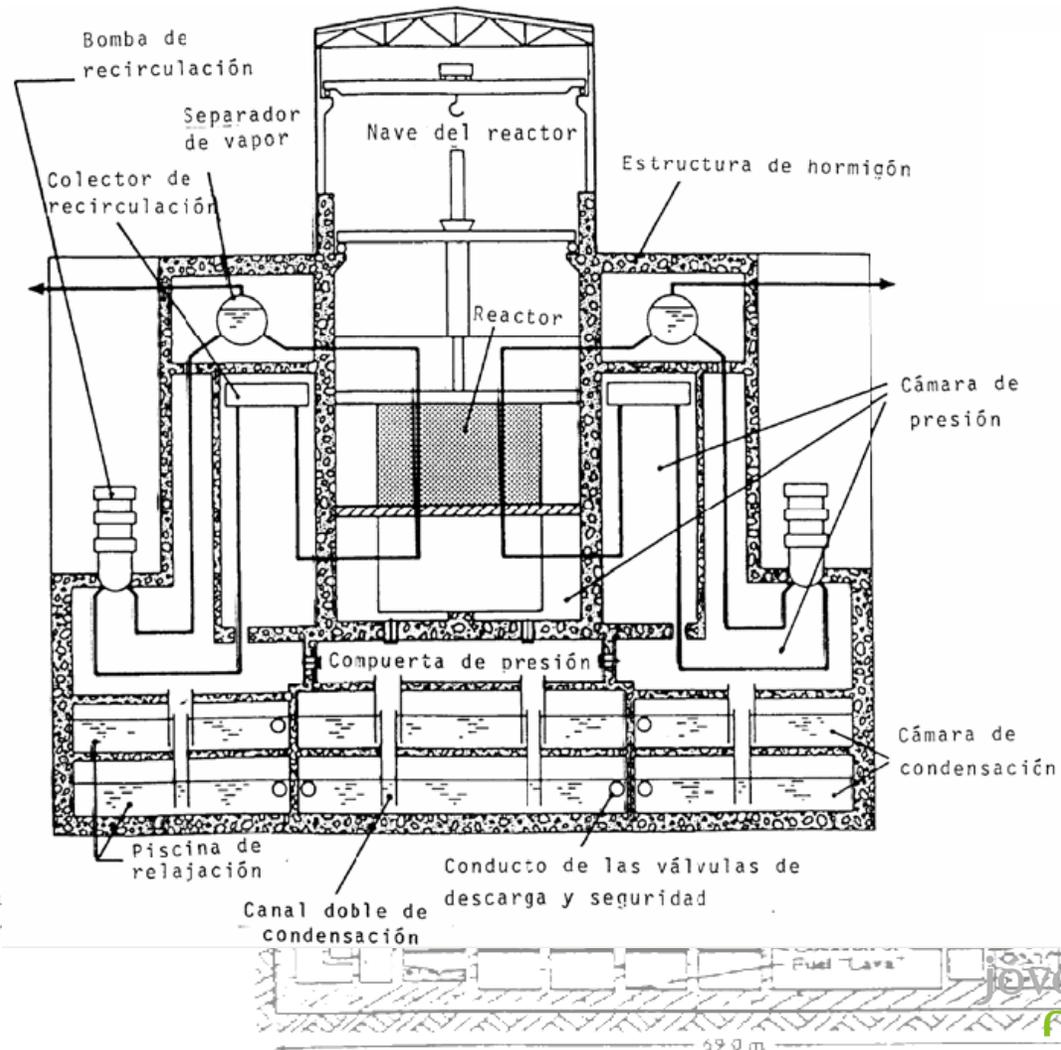
¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Chernobyl II

- **Causas de la gravedad del accidente**
 - Emplazamiento: muy cerca de una ciudad
 - Diseño: reactor inestable, coeficientes de reactividad negativos
 - Diseño: sin barreras, falta de contención
 - Operación: falta de cultura de seguridad, realización de experimento en un reactor de potencia
 - Operación: desconexión de sistemas de seguridad
 - Emergencias: no se desalojó Prypiat hasta 3 días después del accidente
 - Emergencias: trabajo innecesario de los liquidadores



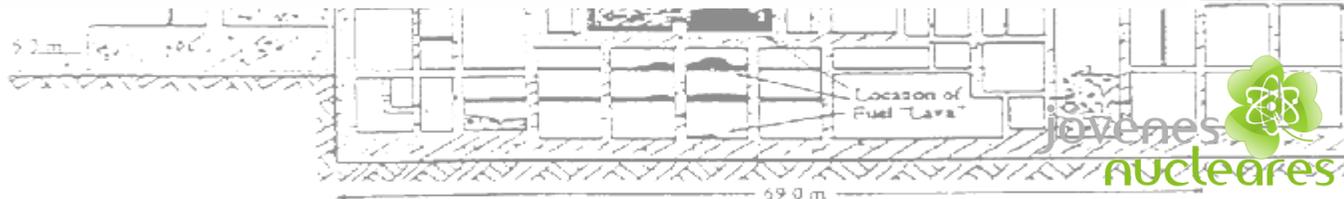
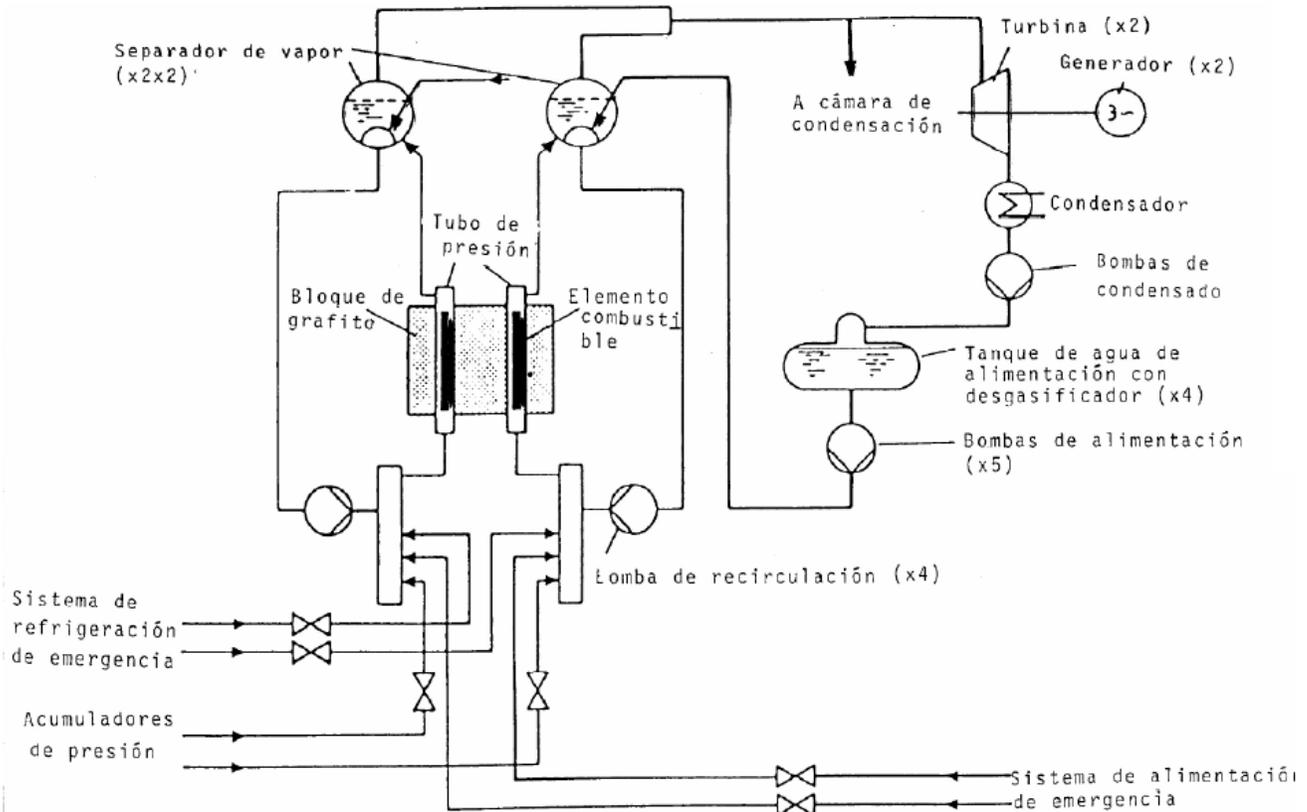
¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Chernobyl III

Alzado de la central



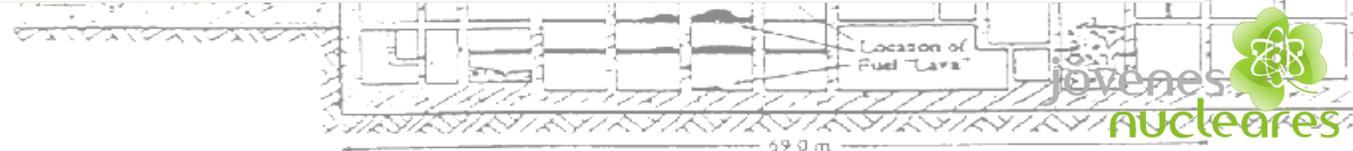
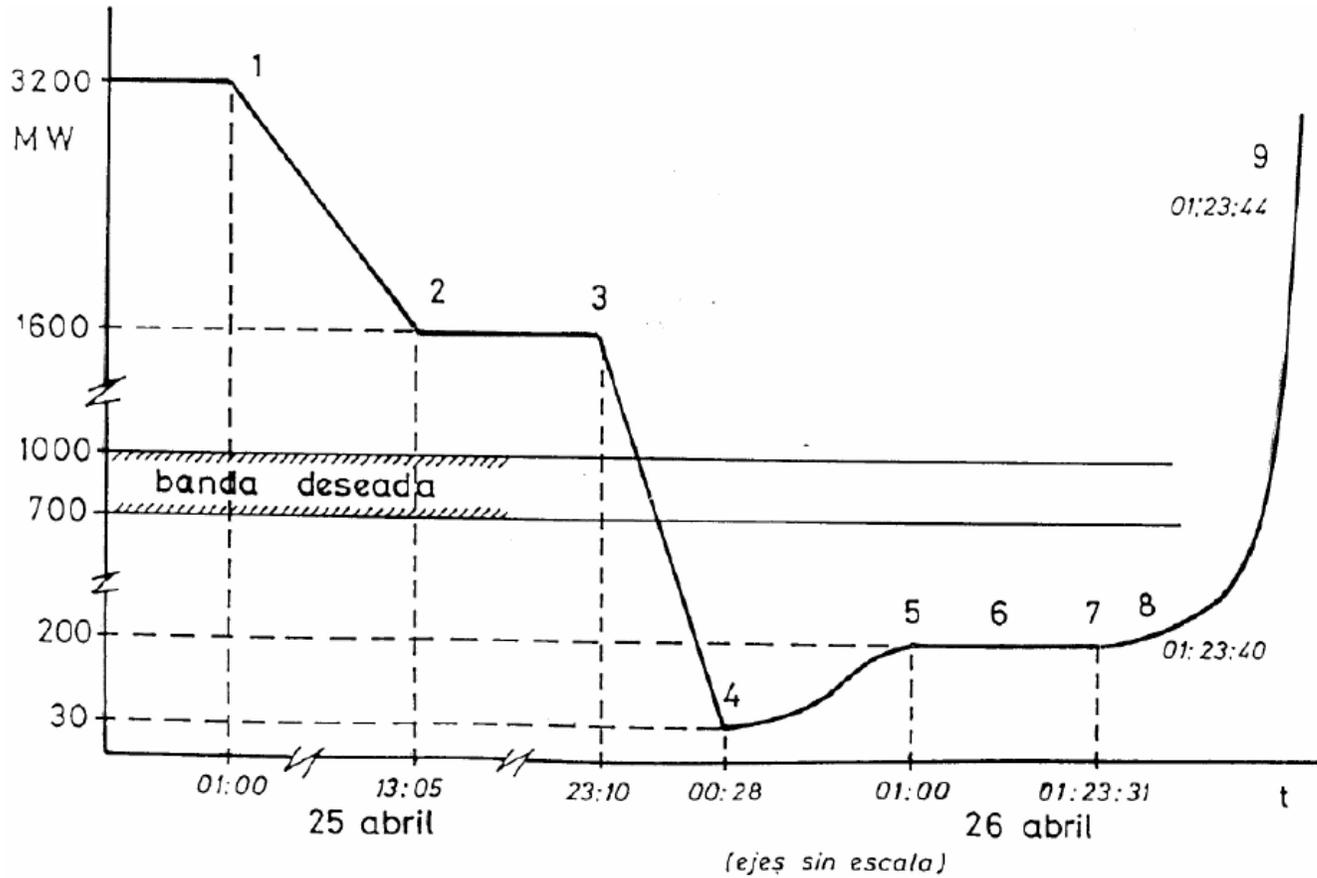
¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Chernobyl IV

Ciclo de la central



¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Chernobyl V

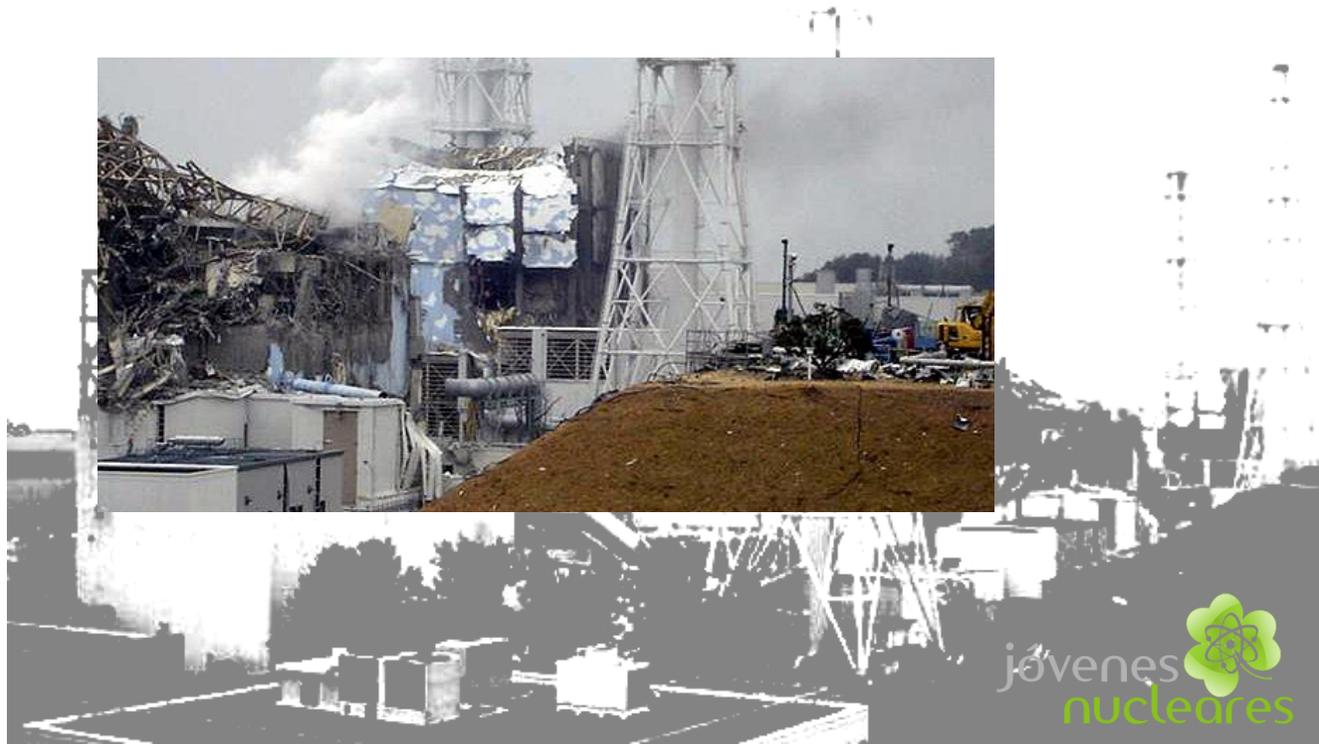
Desarrollo del accidente



¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Fukushima

Fukushima (Japón)

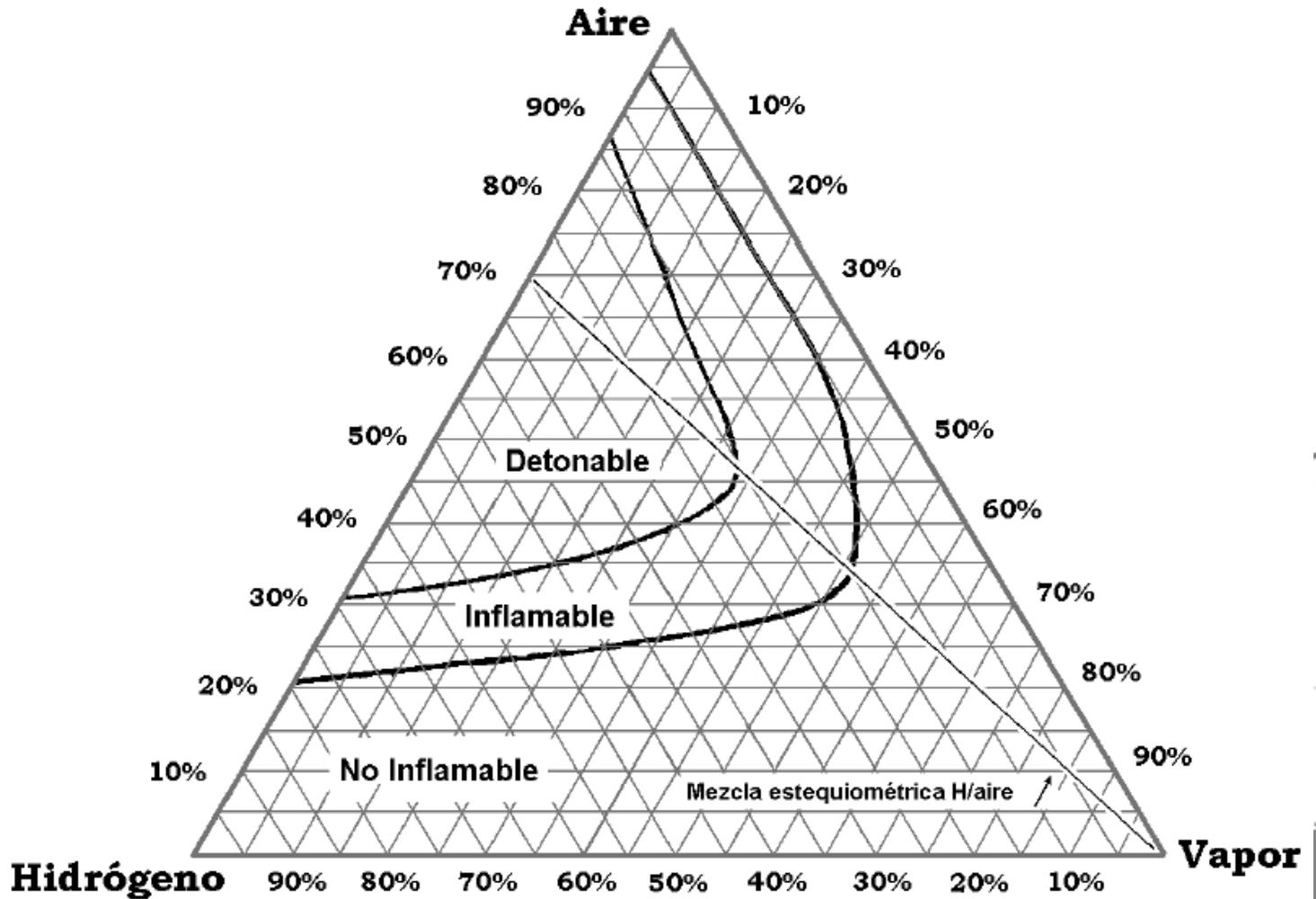
11 – Marzo - 2011



¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Fukushima I

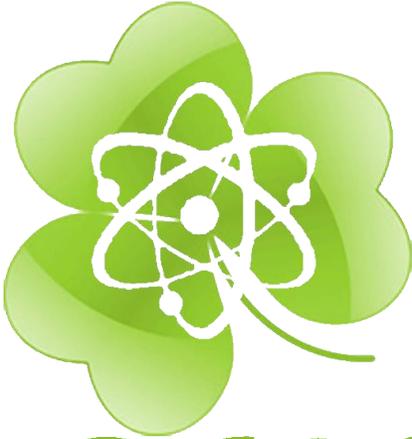


¿Qué pasa en caso ...?: Accidente de Fukushima I



MUCHAS GRACIAS POR LA ATENCIÓN

jóvenes
nucleares



www.jovenesnucleares.org

alfonso.barbas@jovenesnucleares.org