

# La emergencia nuclear en Fukushima

(y todas las cuestiones  
que plantea sobre la energía nuclear)

Ignacio Porras  
Departamento de Física Atómica,  
Molecular y Nuclear  
Universidad de Granada

# El miedo atávico



# El miedo atávico



Japón, viernes 11 de Marzo de 2011,  
14:46:23 hora local (06:46:23 ETC)



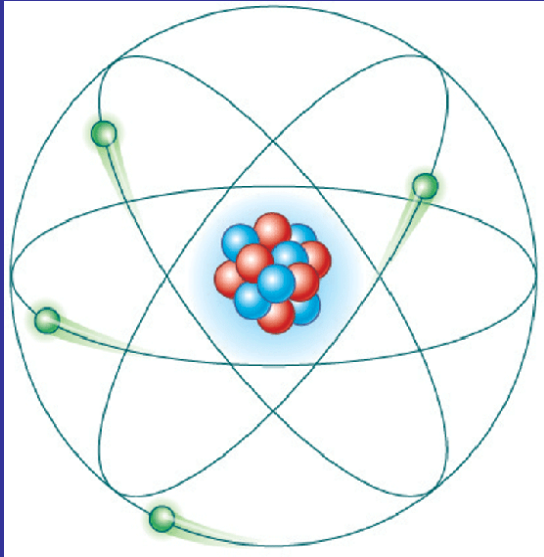
# Resumen

- Fundamentos de la energía nuclear
- Esquema de un reactor nuclear (y tipos)
- Efectos biológicos de la radiación
- Accidente de Chernobyl
- Sucesos de Fukushima
- Comparación y conclusiones

# Introducción a la energía nuclear

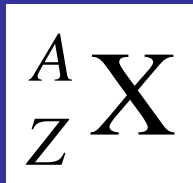
- Energía nuclear:
  - Sueño de los científicos en los años 30
  - Bombas en los años 40
  - Comienza en los años 50
  - Panacea en los años 70
  - “Paria” en los años 90
  - Siglo XXI ?????????????????????????????????

# El núcleo atómico



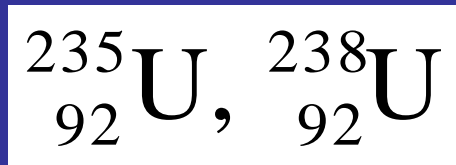
- **Protones** (núcleo del hidrógeno, carga positiva)
- **Neutrones** (sin carga, masa similar a la del protón)
- **Z**: número atómico, determina el elemento químico
- **A=Z+N**, número másico, determina la masa del átomo

Notación:

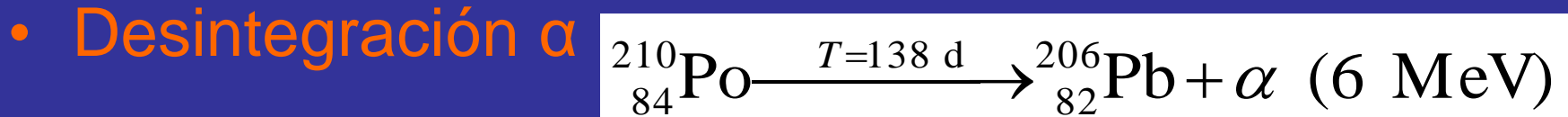


Isótopos: núcleos con el mismo Z (mismo elemento químico) y distinto A.

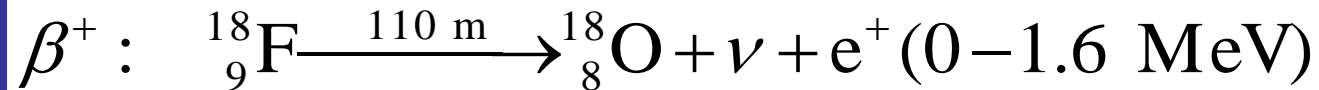
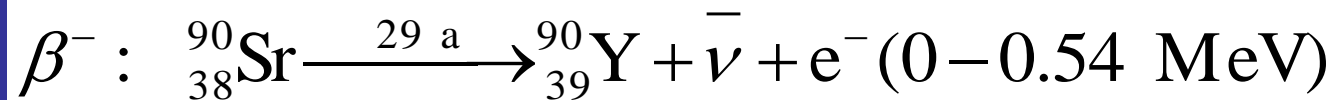
Ej:



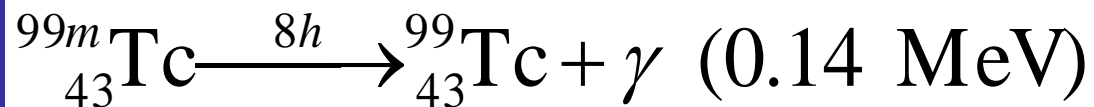
# Desintegraciones nucleares espontáneas (núcleos radiactivos)



- Desintegraciones beta:



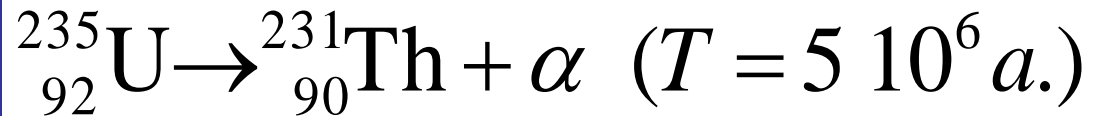
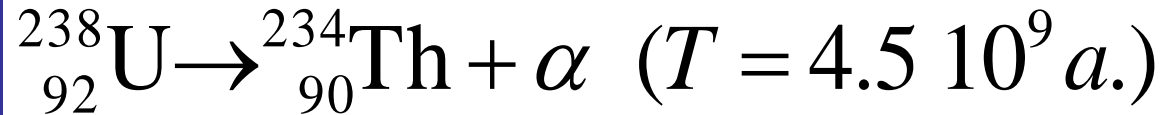
- Emisión gamma (fotones)



$T$ : periodo de semidesintegración (tiempo en el que se desintegran un 50% de los núcleos)



# Isótopos del Uranio



# La fisión del Uranio



## The Nobel Prize in Physics 1938

“por sus demostraciones de la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por irradiación con neutrones, y por sus descubrimientos de reacciones nucleares inducidas por neutrones lentos”

**Enrico Fermi**

Italy

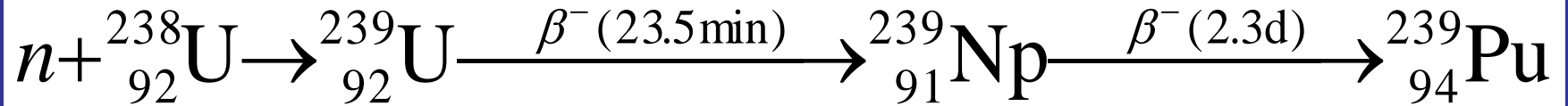
b. 1901

d. 1954

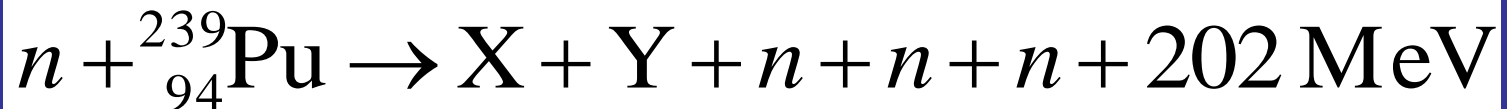
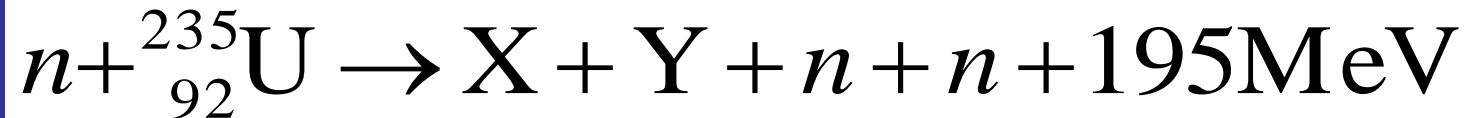


Lise Meitner, Austria

# Reacciones con neutrones



**Captura:**  $n$  de energía entre 1 eV y 1 MeV



**(Fisión)**

${}^{239}\text{Pu}$  NO existe nat.,  ${}^{235}\text{U}$  SOLO 0.7% del U nat

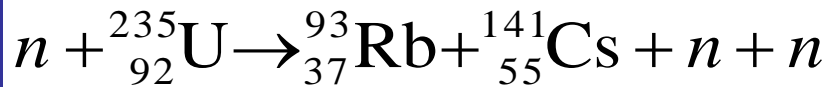
máxima probabilidad para  $n$  inicial *térmico* (0.025 eV)  
 $n$  finales rápidos (1-2 MeV)

# Dos opciones para reacción en cadena

- **Moderación de neutrones**, si tenemos  $^{235}\text{U}$  en pequeña proporción (aunque haya que enriquecer la proporción natural, entre 1 y 5 %).  
=> **reacción controlada** (CENTRAL NUCLEAR)
- Con neutrones rápidos, si tenemos  $^{235}\text{U}$  ó  $^{239}\text{Pu}$  puro (+ de 90%) => **reacción explosiva** (BOMBA ATÓMICA)

# Un poco de física

- ¿De dónde sale la E liberada?
- De una pérdida de masa:  $E = m c^2$



$$m(n) = 1.008665 \text{ u}$$

$$m({}_{92}^{235}\text{U}) = 235.0439 \text{ u}$$

$$m({}_{37}^{93}\text{Rb}) = 92.92172 \text{ u}$$

$$m({}_{55}^{141}\text{Cs}) = 140.91949 \text{ u}$$

$$m \text{ inicial} = 236.0525 \text{ u}$$

$$m \text{ final} = 235.8585 \text{ u}$$

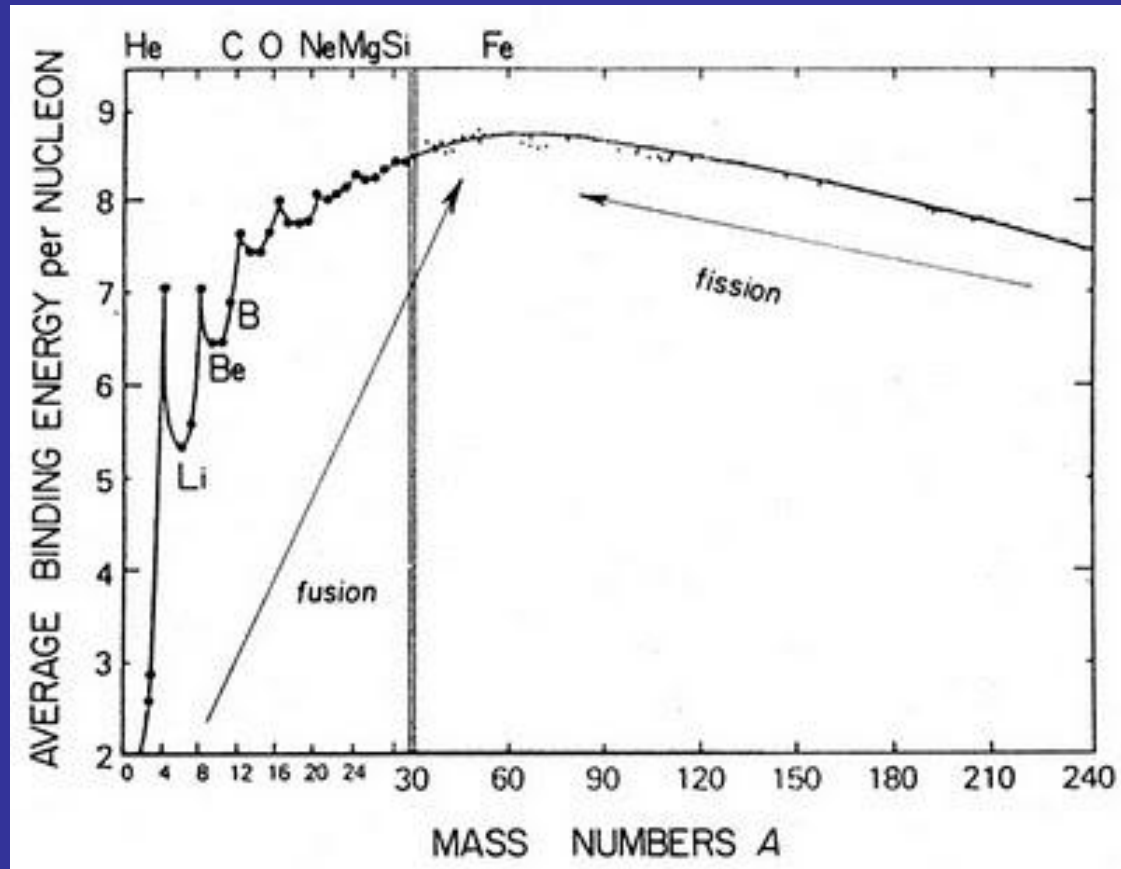
$$\text{dif} = 0.194 \text{ u} \Rightarrow E = 181 \text{ MeV}$$

En reacciones químicas, la energías no se traducen en diferencias de masas apreciables

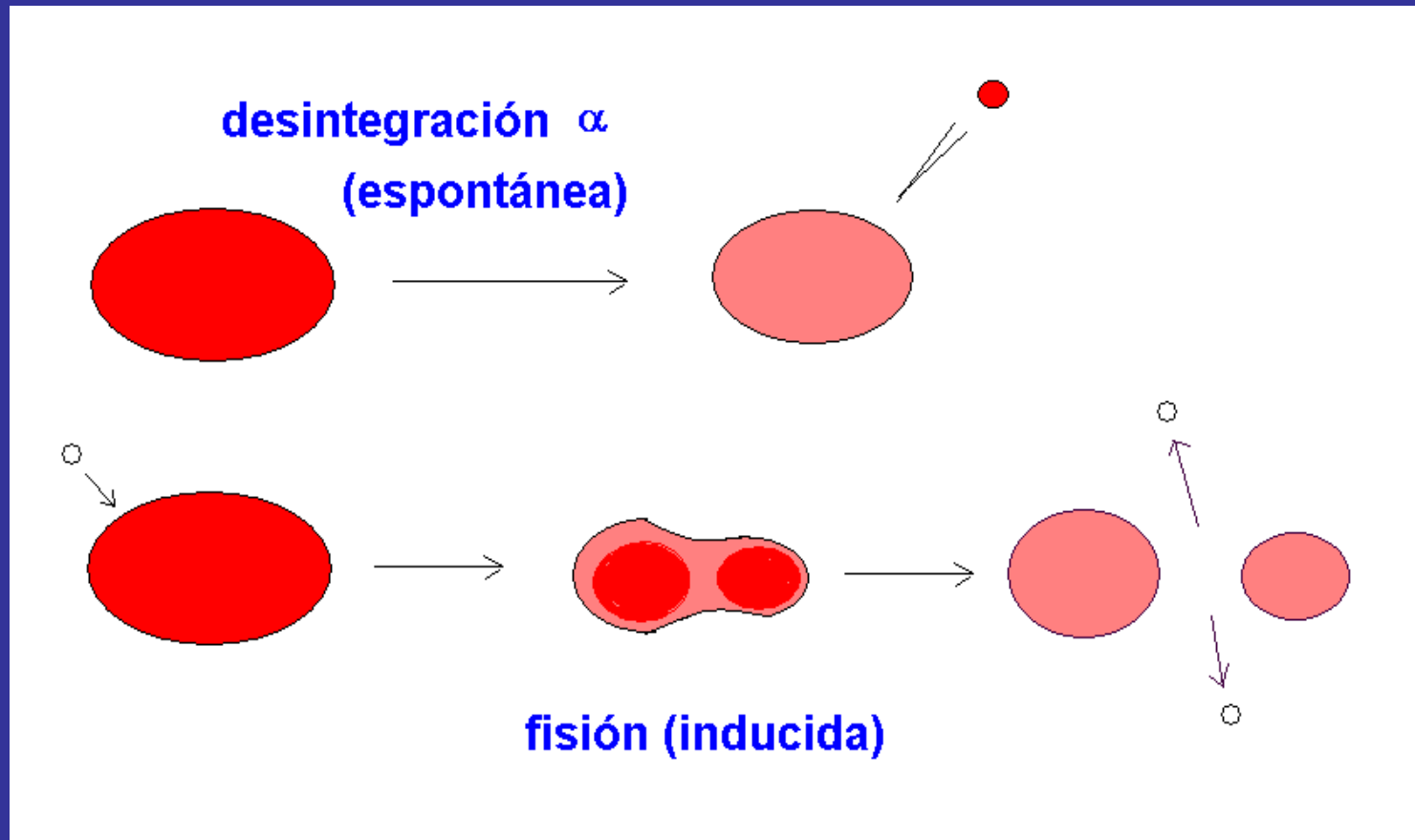
1 gr de U-235 libera 80000 MJ de energía (22000 kWh), similar a 2,7 tons de carbón (hulla) o 1,9 tons de petróleo

- ¿Porqué se usan neutrones para inducir las reacciones nucleares?
- Razones:
  - No tienen carga (mas fácil llegar al núcleo y penetrar en el mismo)
  - Interaccionan fuertemente con el núcleo (pueden producir cambios en su estructura)

- ¿Porqué se rompe un núcleo pesado?
- Se gana energía de enlace por nucleón (energía desprendida al formarse un núcleo)



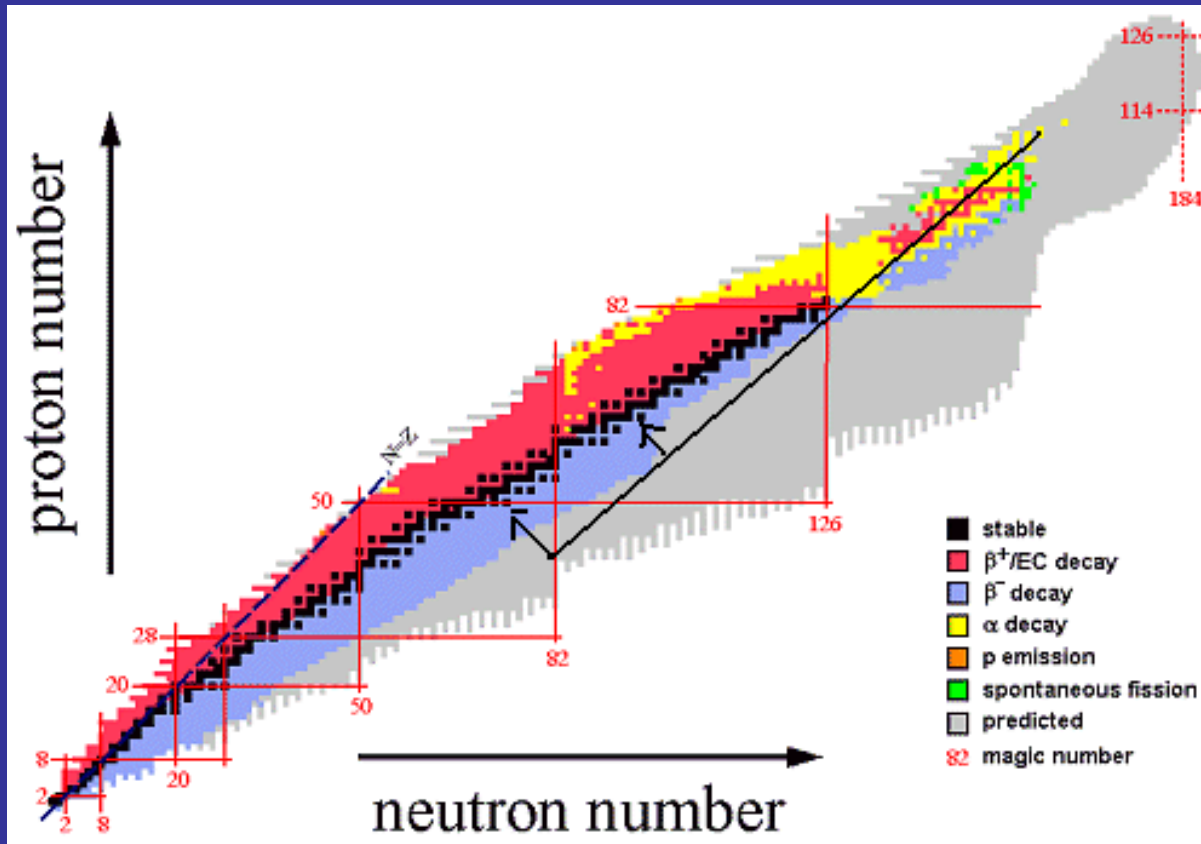
- Inestabilidad de núcleos pesados debida a la repulsión entre cargas positivas, pese a la interacción nuclear fuerte atractiva





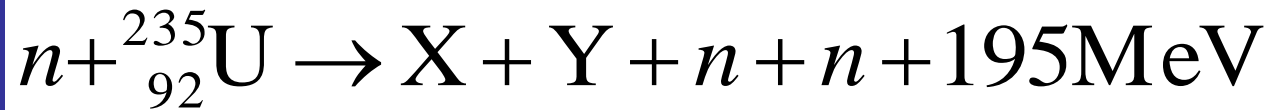
- ¿Porqué U-235 sí, U-238 no?
- Ligera mayor estabilidad U-238 por tener número de protones y neutrones ambos pares (*pairing*)
- Si el U-235 captura un neutrón se convierte en par-par.
- Entonces adquiere una energía de excitación (6.5 MeV) que vence la barrera de fisión (5.3 MeV).
- U-238 solamente adquiere 4.8 MeV al capturar un neutrón

# ¿Porqué los residuos de fisión son radiactivos?



Emisores  $\beta^-$   
Son muy variados:  
 $^{85}\text{Kr}$  (10 a.)  
 $^{90}\text{Sr}$  (28 a.)  
 $^{99}\text{Tc}$  (0.2 Ma.)  
 $^{131}\text{I}$  (8 d.)  
 $^{135}\text{Xe}$  (9.14 h)  
 $^{137}\text{Cs}$  (30 a.)

# Moderación de neutrones



- Características de un moderador:
  - **Densidad elevada** (no gas)
  - **Núcleos ligeros** (pocas colisiones necesarias)  
 $n$ : número de colisiones necesarias para pasar de 0.5 MeV a 1 eV, debe ser bajo
  - **Poca probabilidad de captura del  $n$**   
 $\sigma_c / \sigma_{el}$ : probabilidad relativa de captura, debe ser baja

**Moderating ratio:**

$$MR = \frac{\ln(2 \cdot 10^6)}{n} \frac{\sigma_{el}}{\sigma_c}$$

# Propiedades de los moderadores

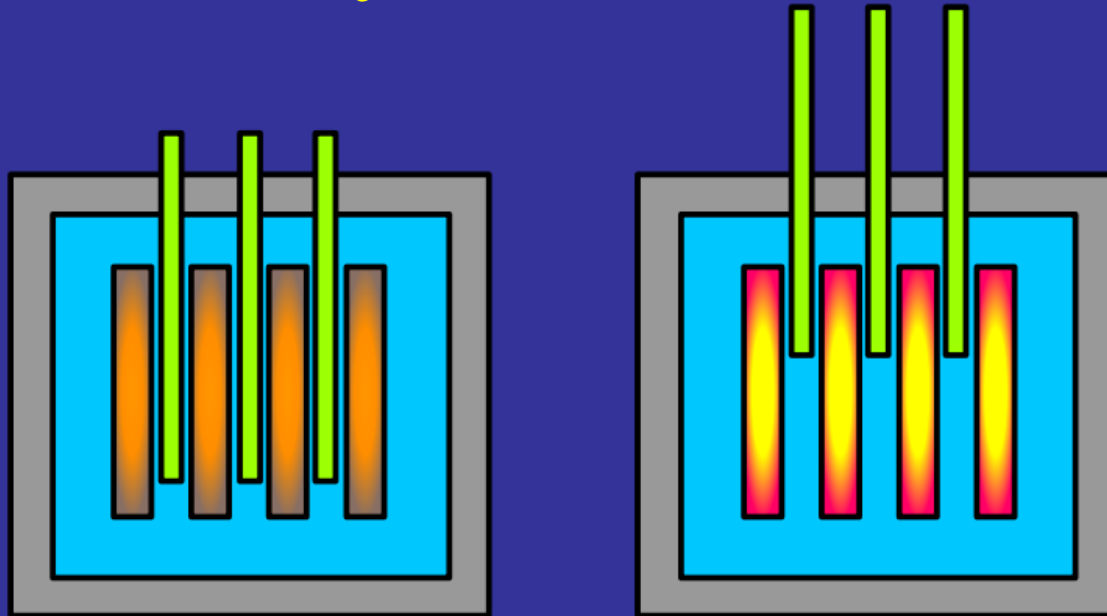
Material	$n$	$\sigma_c / \sigma_{el}$	MR
H <sub>2</sub> O	16	0.01296	71
D <sub>2</sub> O	29	0.00009	5670
C (grafito)	91	0.00082	192
U	1730	0.88889	0.009

# Ciclo de los neutrones en un reactor

- Se crean 2 ó 3 neutrones por fisión U-235
- Algún neutrón rápido puede fisiónar el propio U-235 (escaso)
- Se van moderando, pudiendo ser capturados por **U-238** (produciendo Pu-239), por el **moderador** u otro elemento (venenos, incluyendo **productos de fisión** y **controladores**)
- Pueden escapar del reactor

# Controladores

Barras de Cd:  $n + {}^{113}\text{Cd} \rightarrow {}^{114}\text{Cd} + \gamma$   $\sigma_c = 20000 \text{ b}$   
reducen el factor  $f$  : *reducen la reactividad (a voluntad)*  
(otro ejemplo: boro en disolución  
 $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$   $\sigma_c = 3800 \text{ b}$ )



# Venenos

Cualquier otro elemento dentro del núcleo que pueda capturar neutrones, incluyendo productos de fisión y refrigerante (si no es el propio moderador).



Si un reactor se apaga, hay que esperar para encenderlo casi un mes hasta que se desintegre el Xenon (que captura neutrones iniciales)



# Refrigerante

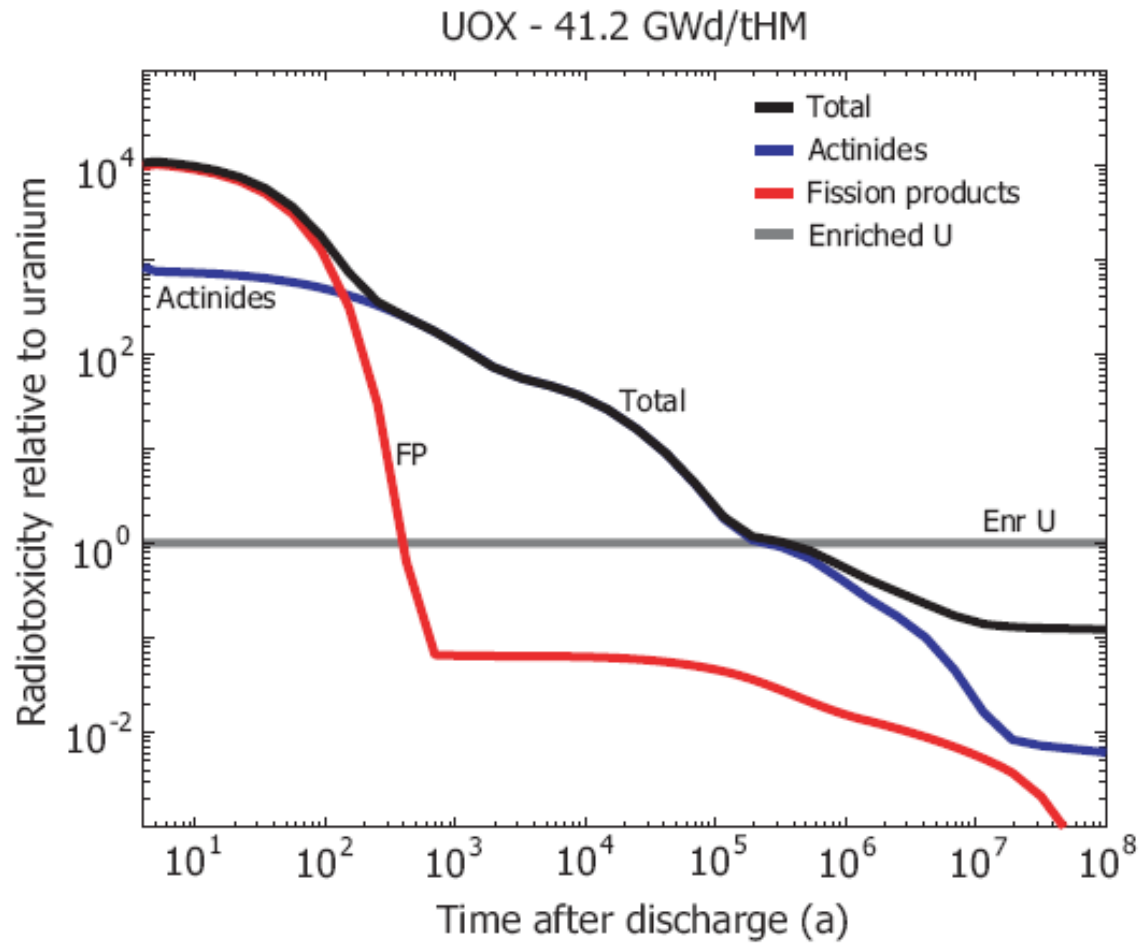
- Para extraer el calor desprendido en las reacciones de fisión y enfriar el reactor
- Puede ser el propio moderador (caso del agua)
- También puede usarse gas (He ó CO<sub>2</sub>)
- Otra posibilidad es metal líquido (Na)



# Residuos radiactivos

- **Productos de fisión:**
  - radiactividad  $\beta, \gamma$  con T variados
  - algunos útiles para aplicaciones médicas e industriales
- **Actínidos (U y transuránidos):**
  - Isótopos de Np, Pu en adelante por subsecuentes capturas de  $n$  y desintegración  $\beta$
  - Vidas medias muy largas en algunos casos
  - Emiten además radiación  $\alpha$
  - Se desintegran en cadenas (pasan por Rn-gaseoso)

# Radiactividad de residuos



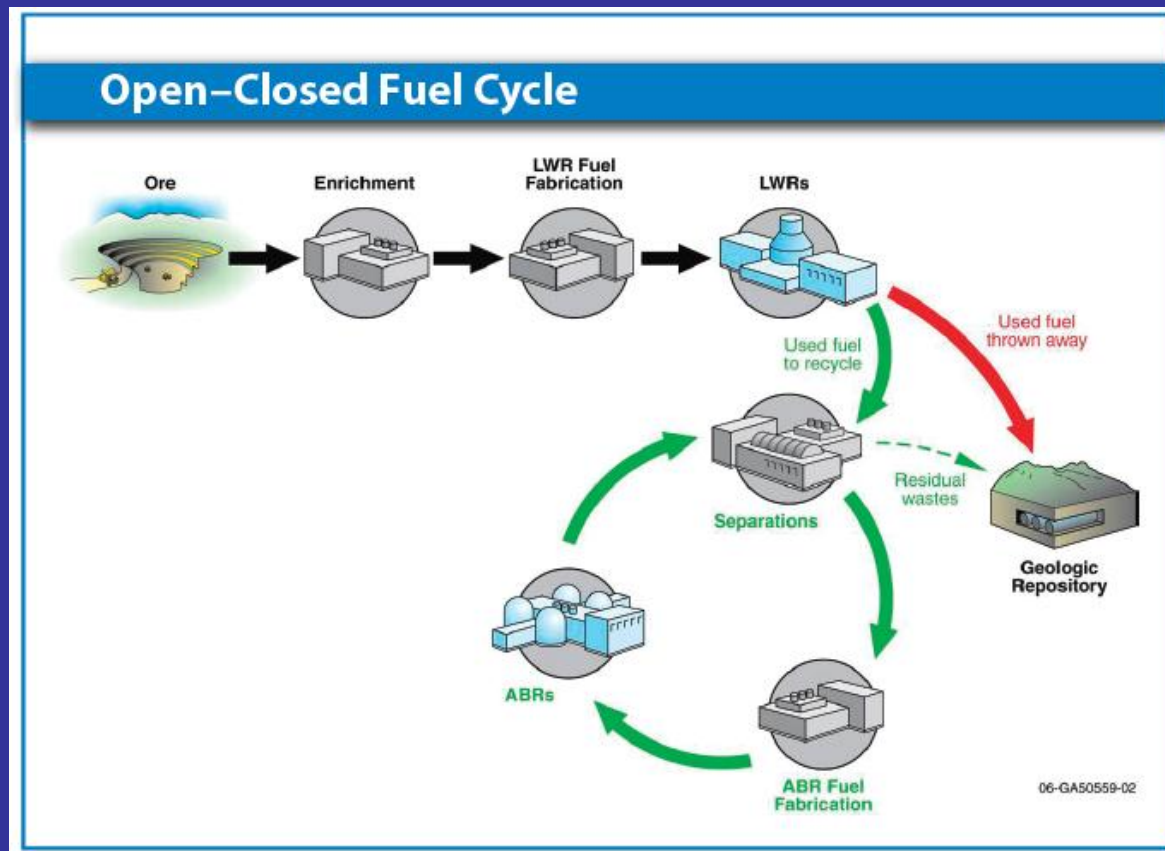
# Reprocesamiento

- Extracción de Pu y U (PUREX):
  - peligro de proliferación de material para armas atómicas
  - posible uso como combustible
  - Puede extraerse un 99.9% de los mismos
  - De larga vida, solo quedaría Am, Np y Cm

Country	Location	Capacity tU/a	Commissioning
F	La Hague, UP 2-800	800/1000	1994
F	La Hague, UP 3	800	1990
GB	Sellafield, Magnox	1,500	1964
GB	Sellafield, THORP	1,200	1997
IND	Trombay	60	1965
IND	Tarapur	100	1982
IND	Kalpakkam	100	1998
J	Tokai Mura	210	1977
J	Rokkashomura	800	2006
RUS	Tscheljabinsk	400	1978
RUS	Krasnojark	1,500	

# Reciclado: mejor que reprocesamiento

- David Bodansky, Physics Today, 2006:
  - UREX+ Extracción de U (+ Sr, Cs)
  - El resto es Pu con los actínidos menores (no sirve para bombas), combustible de un *breeder*.
  - Almacenaríamos fundamentalmente U en repositorios



# Resumen

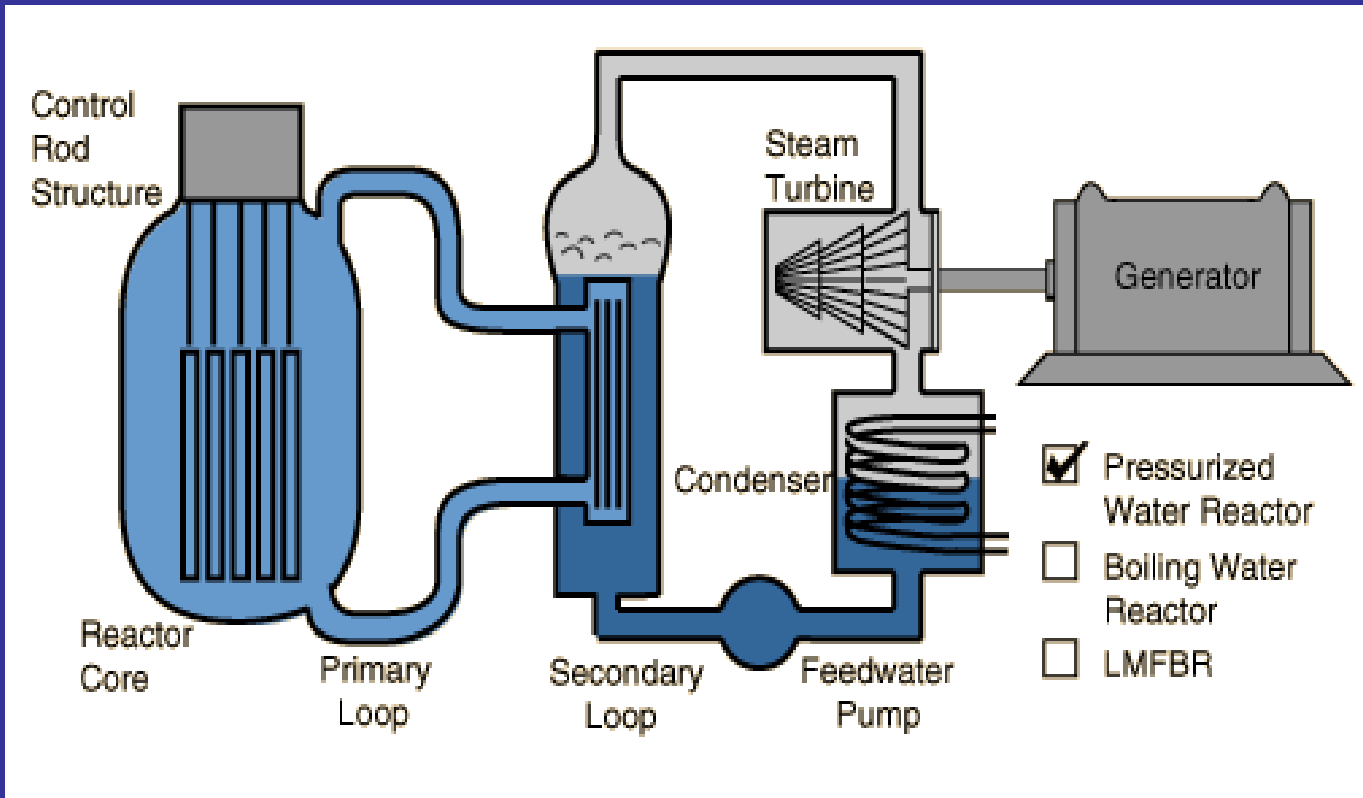
- Elementos:
  - Uranio enriquecido (combustible)
  - Moderador (agua, agua pesada o grafito)
  - Refrigerante (agua, gas o metal líquido)
  - Controladores (barras de Cd o Boro en disolución)

# Tipos de reactores nucleares

- Moderados por agua ligera (LWR):
  - PWR
  - BWR
- Moderados por agua pesada o grafito (mayor producción de Pu)
  - PHWR (CANDU)
  - GCR
  - LGR
- Sin moderador (neutrones rápidos)
  - LMFBR

# Reactores de agua ligera (LWR)

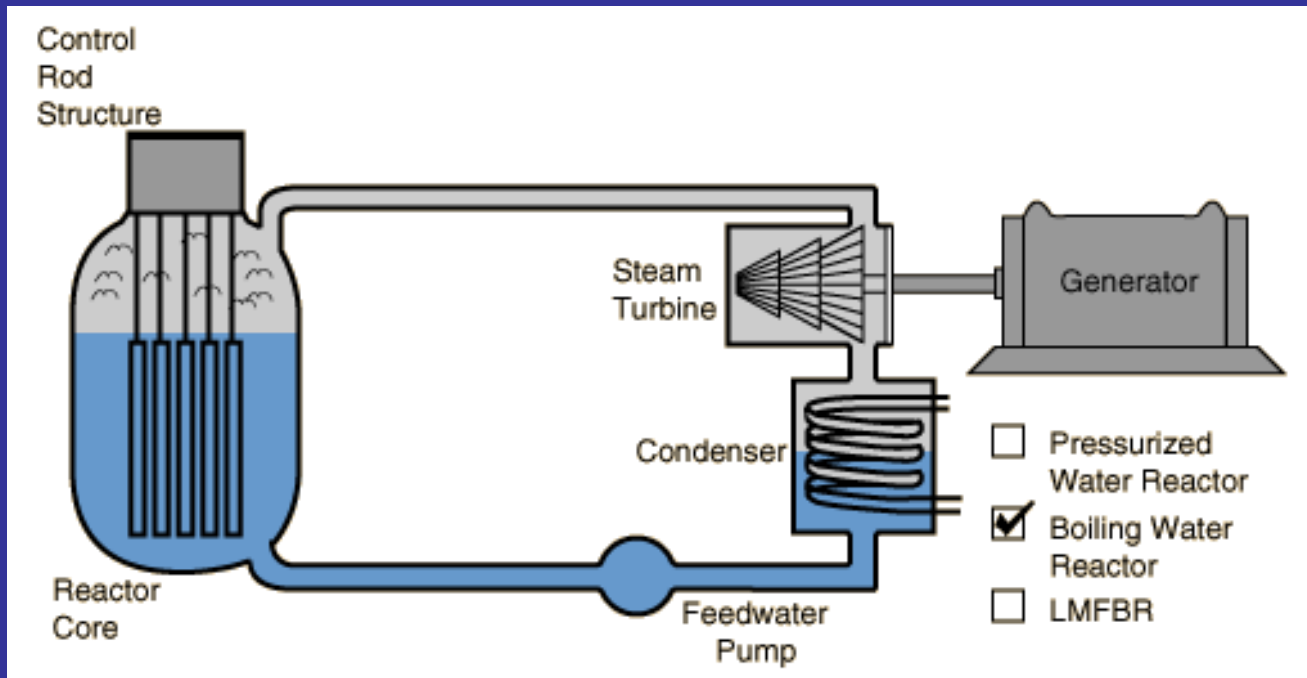
- **LWR** : (*Light Water Reactor*: reactor de agua ligera) (subtipos **PWR** y **BWR**) 86%



Moderador  
y  
refrigerante:  
 $H_2O$   
66% de los  
reactores  
mundiales  
(todos los  
países)

# Reactores de agua ligera (LWR)

- **LWR** : (*Light Water Reactor*: reactor de agua ligera) (subtipos **PWR** y **BWR**) 86%



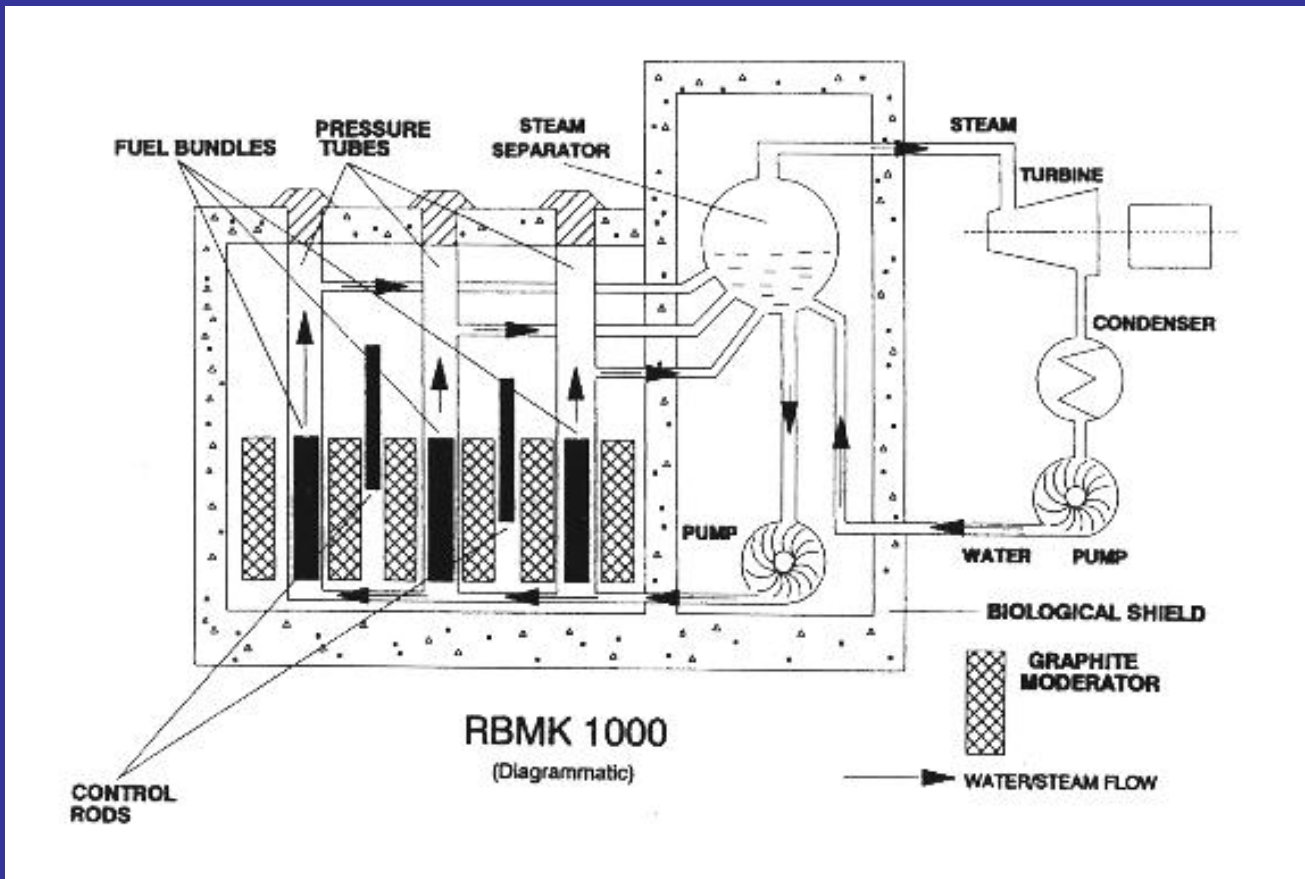
Moderador  
y  
refrigerante:  
 $H_2O$   
66% de los  
reactores  
mundiales  
(todos los  
países)



Nombre	Tipo	Pot. (MWe)	Prev. (año)	Cons. (año)	Oper. (año)	Estado
<b>1ª Familia</b>						
José Cabrera	W-PWR-1L	160	1963	1964	1968	Desmant. <sup>3</sup>
Santa María de Garoña	GE-BWR/4	460 <sup>1</sup> /465,6 <sup>2</sup>	1963	1966	1971	Operación
Vandellós I	F-GCR	500	1967	1968	1972	Desmant. <sup>4</sup>
<b>2ª Familia</b>						
Almaraz I	W-PWR-3 L	930 <sup>1</sup> /1.045 <sup>2</sup>	1971	1973	1982	Operación
Almaraz II	W-PWR-3 L	930 <sup>1</sup> /984 <sup>2</sup>	1971	1973	1984	Operación
Lemóniz I	W-PWR-3 L	930	1972	1974	—	Cancelado
Lemóniz II	W-PWR-3 L	930	1972	1974	—	Cancelado
Ascó I	W-PWR-3 L	930 <sup>1</sup> /1.032,5 <sup>2</sup>	1972	1974	1985	Operación
Ascó II	W-PWR-3 L	930 <sup>1</sup> /1.027,2 <sup>2</sup>	1972	1975	1986	Operación
Cofrentes	GE-BWR/6	975 <sup>1</sup> /1.104 <sup>2</sup>	1972	1975	1985	Operación
<b>3ª Familia</b>						
Valdecaballeros I	GE-BWR/6	975	1975	1979	—	Cancelado
Valdecaballeros II	GE-BWR/6	975	1975	1979	—	Cancelado
Vandellós II	W-PWR-3 L	930 <sup>1</sup> /1.087 <sup>2</sup>	1976	1980	1988	Operación
Trillo I	KWU-PWR-3L	1030 <sup>1</sup> /1.066 <sup>2</sup>	1975	1979	1988	Operación
Trillo II	KWU-PWR-3L	1.030	1975	1979	—	Cancelado

# Reactores de grafito

- **LGR:** (*Light water graphite reactor*)

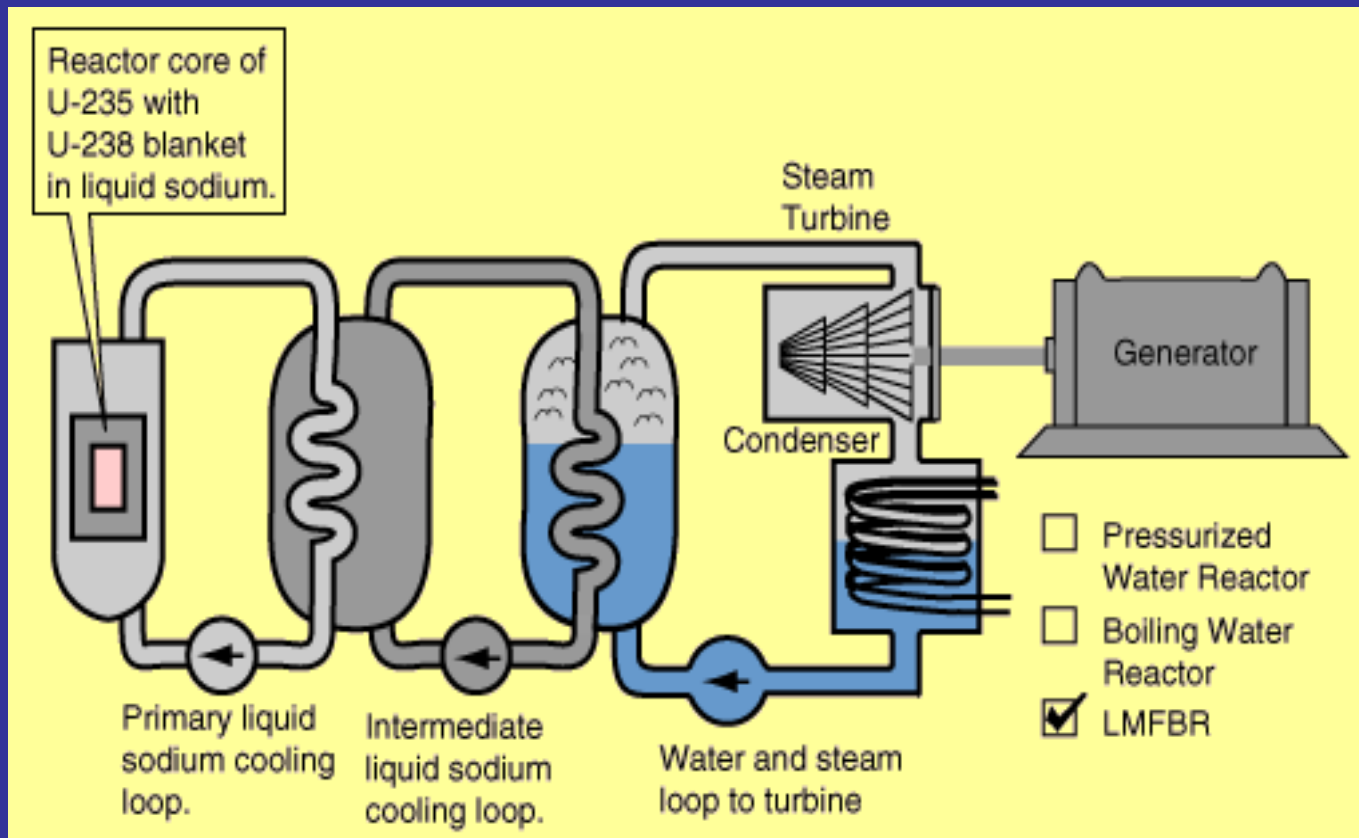


Moderador:  
Grafito  
Refrigerante:  
H<sub>2</sub>O

RBMK  
antigua  
URSS

# Reactores de neutrones rápidos

- **LMFBR:** (*Liquid metal fast breeder reactor*)



Combustible:  
20%  $^{239}\text{PuO}_2$   
80%  $^{238}\text{UO}_2$

Moderador:  
No hay

Refrigerante:  
Na líquido

2 en FRA

1 en Rusia

Proyectados  
en Japón

# Seguridad

- **No** hay masa crítica para explosión nuclear
- Radiactividad al medio ambiente **nula**
- **Problema:** posibilidad de exposición de material radiactivo del núcleo por accidente.
  - **Material radiactivo en cápsulas** (solo a alta T escaparían elementos volátiles).
  - **Tubos de Zr contienen las cápsulas** (1850° p.f.)
  - **Retenidos vasija del núcleo y circuito primario**
  - **En caso de fuga de éstos, edificio contención.**

# El “Síndrome de China”

- Fusión del U por funcionamiento supercrítico
- Se atravesaría el suelo del núcleo, nada detendría al U en el subsuelo
- **Nunca se ha dado, sí hay** posibilidad de exposición del núcleo del reactor por falta de refrigeración y funcionamiento supercrítico (material radiactivo a la atmósfera).
- **Control de reactividad:** alimentación **positiva** (crece la reactividad con T) o **negativa** (decrece la reactividad con T)

# Control de reactividad

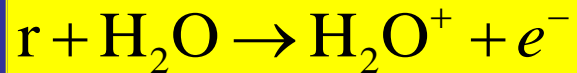
- **LWR (PWR y BWR): alim. Negativa**
  - Efecto Doppler: aumenta  $T \Rightarrow$  mayor movimiento átomos de  $U \Rightarrow$  aumenta la captura de  $n$
  - Por formación de burbujas en agua, se reduce la moderación
- **Reactores moderados por grafito**
  - El agua es más veneno que moderador (formación de burbujas acelera la reacción)

# Enfriamiento

- Hasta cuando el reactor está apagado, la radiación de los isótopos de vida media muy corta produce un enorme calor.
- Circuito principal + de emergencia de refrigeración, sistema de inyección de alta presión.
- Hasta tres fuentes de electricidad para la refrigeración.
- Accidente TMI (USA): errores en agujas produjeron casi el vaciado del agua. Exposición a la radiación solo de trabajadores (0.04 Sv), sin víctimas.

# Efectos biológicos de la radiación

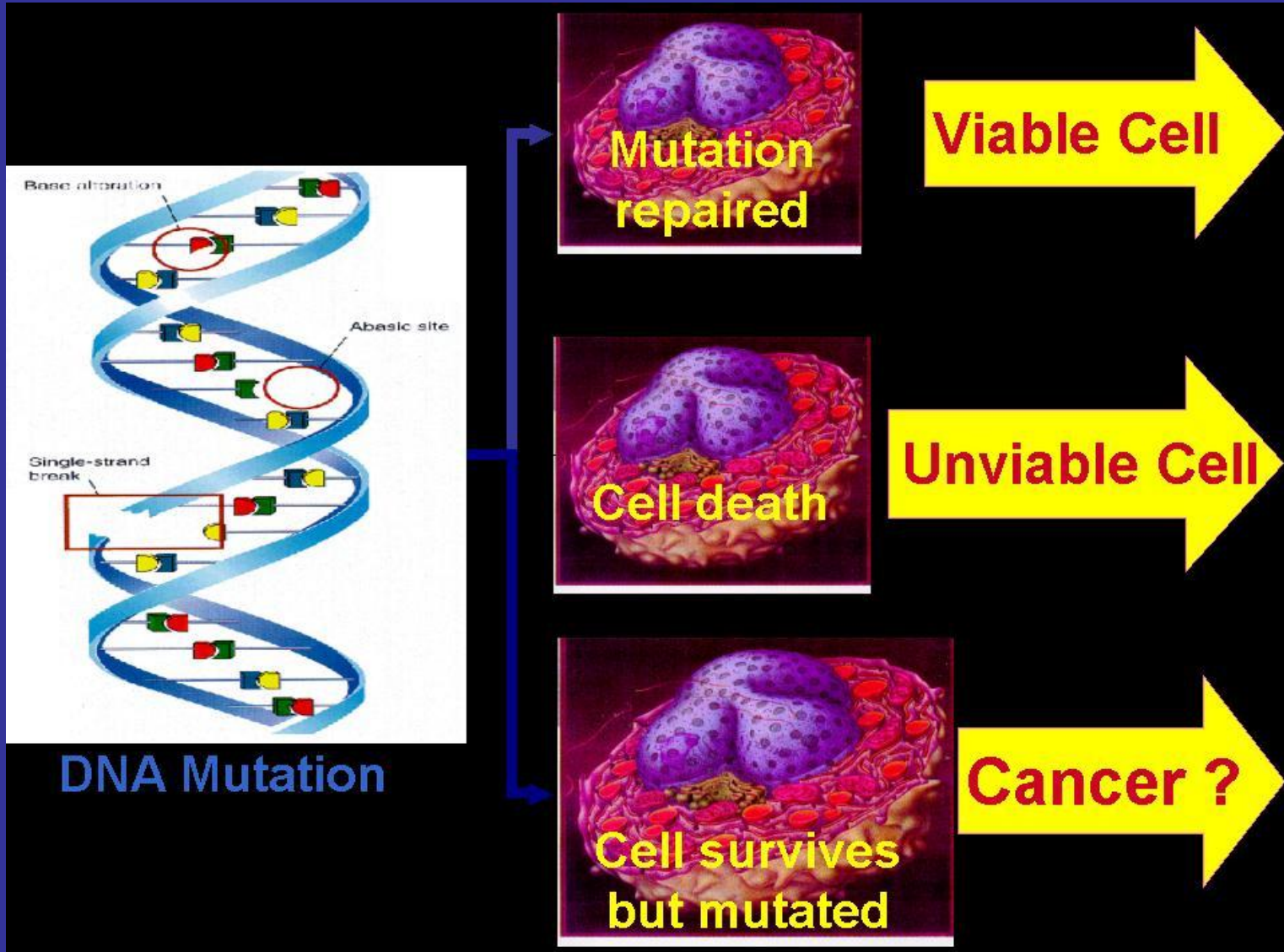
- La ionización del H<sub>2</sub>O y de las moléculas orgánicas produce radicales libres, muy reactivos.



- Las reacciones químicas entre dichos radicales y moléculas importantes para la vida, como el ADN (ej. **roturas de cadena**), producen alteraciones en el desarrollo y reproducción de las células.
- También puede producirse acción directa sobre el ADN



# Efecto celular



# Efectos de la radiación

- Efectos directos (deterministas): dosis altas.
  - Dosis umbral
  - La gravedad crece con la dosis
  - Relacionado con muerte celular
  - Inmediatos
  - **Cuantificado por las dosis umbrales**
- Efectos estocásticos (probabilísticos): dosis bajas.
  - No se conocen dosis umbrales
  - La gravedad no crece con la dosis
  - Relacionado con mutaciones celulares no reparadas
  - Pueden aparecer años después
  - **Cuantificados por coeficientes de riesgo**

# Efectos deterministas: dosis umbrales

- Requieren la muerte de un gran número de células.
- Dependen del órgano/tejido
- La dosis umbral para irradiación a todo el cuerpo por debajo de la cual no se esperan efectos directos es 0.2 Sv
- **Órganos concretos tienen mayores umbrales:**

Médula (red.hematopoyesis)	0.5 Sv
Piel (eritema transitorio)	2 Sv
Cristalino (catarata)	5 Sv
Gónadas (esterilidad)	3.5-6 Sv

# Efectos directos por radiación en todo el cuerpo (dosis agudas)

0.75 Sv	Debilidad temporal, normalmente recuperación en pocas horas.
2 Sv	Vómitos en unas horas. Vulnerabilidad a las infecciones por la destrucción de glóbulos blancos
6 Sv	Muerte en varias semanas por destrucción de órganos donde se forma la sangre.
12 Sv	Muerte en varios días por daño en el aparato gastro-intestinal.
100 Sv	Muerte en pocas horas por daños en el sistema nervioso central.

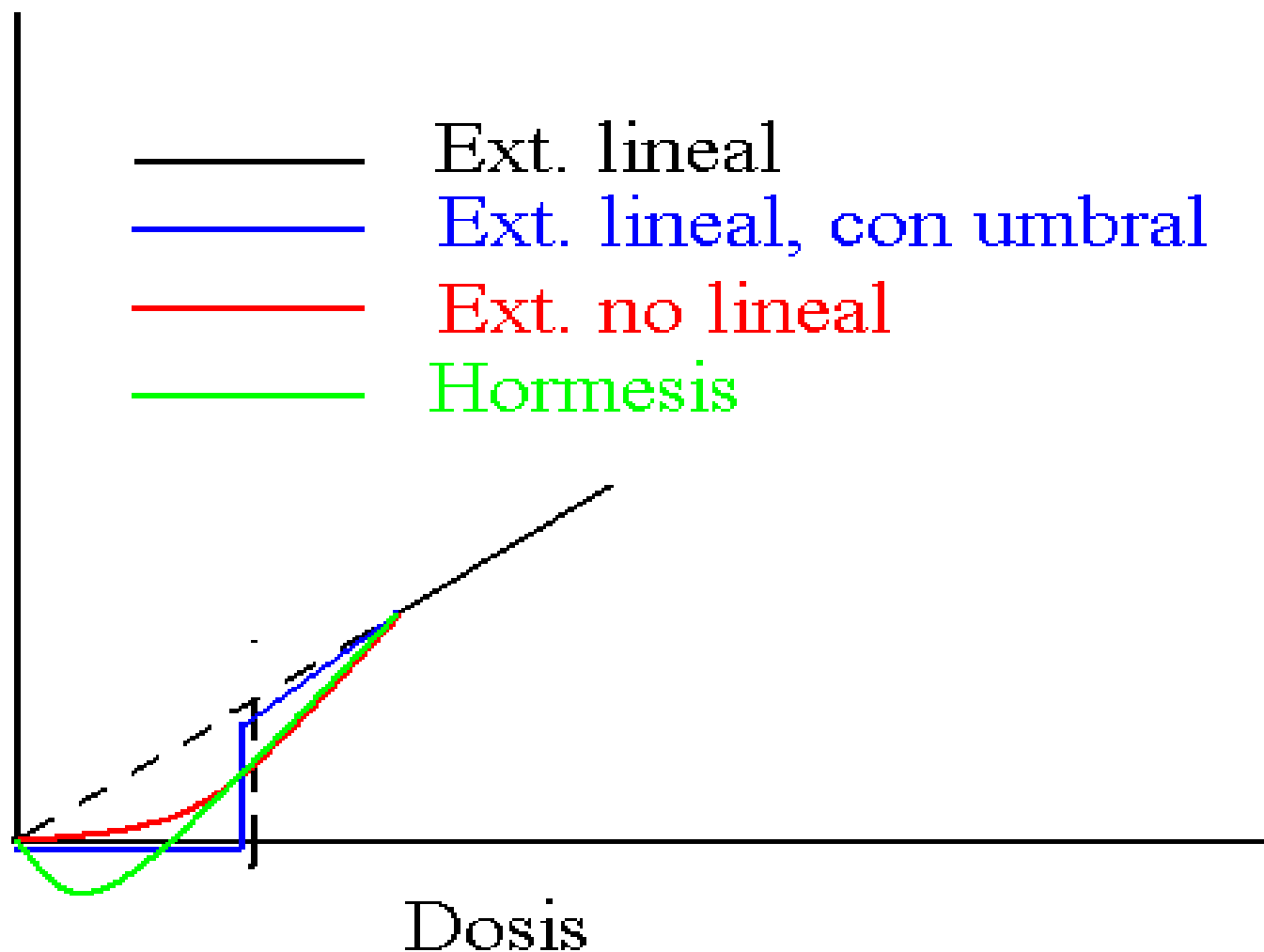
# Efectos estocásticos: coeficientes de riesgo de cánceres mortales (%/Sv)

Piel	0.02
Tiroides	0.08
Mama	0.20
Médula	0.50
Pulmón	0.85
Colon	0.85
Estómago	1.10
Cualquier tipo	5.00

Fuente: ICRP (International Commission on Radiation Protection), Report 60 (1990)

# Dosis pequeñas

Prob. efecto respecto a la natural



# Protección radiológica

Medscape® www.medscape.com

Level of risk	Total risk of detrimental radiation effect	Effective dose for adults (mSv)
I Trivial	$\sim 10^{-6}$ or less	< 0.1
IIa Minor	$\sim 10^{-5}$	0.1 - 1
IIb Intermediate	$\sim 10^{-4}$	1 - 10
III Moderate	$\sim 10^{-3}$ or more	> 10

	Limites recomendados (ICRP 60)
Dosis efectiva total	1 mSv por año
Dosis equivalente en órgano	Ojo: 15 mSv/a. Piel: 50 mSv/a.
Dosis ambiental	2.4 mSv/año

# Dosis por fuentes naturales y artificiales

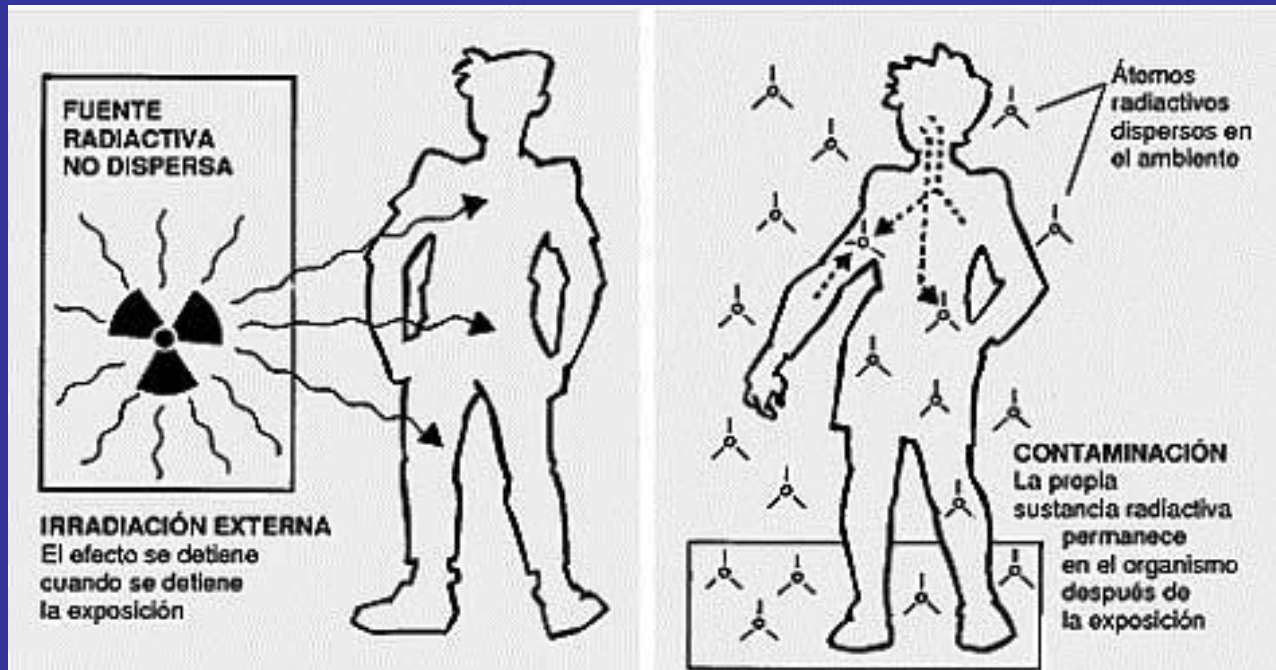
Fuente	Dosis media por hab (mSv/año) y máxima
Rayos cósmicos (y productos)	0.39 (2.0)
Radiación terrestre (exc. Rn)	0.69 (4.9)
Radon y sus productos	1.28 (10)
<b>Total fuentes naturales</b>	<b>2.4</b>
Aplicaciones médicas	0.6 (0.9)
Tests bombas nucleares	0.11
Energía nuclear (inc. accidentes)	0.007
<b>Total fuentes artificiales</b>	<b>0.7</b>



# Dosis por rayos cósmicos

	Dosis (mSv/a)
La Paz (3900m)	2.02
Mexico (2240m)	0.82
Nivel del mar	0.27
Vuelos (600h a10km)	1.80
(1200h a15km)	11.0
Skylab 4 (435 km)	19.0

# Exposición a material radiactivo



Actividad en organismo:

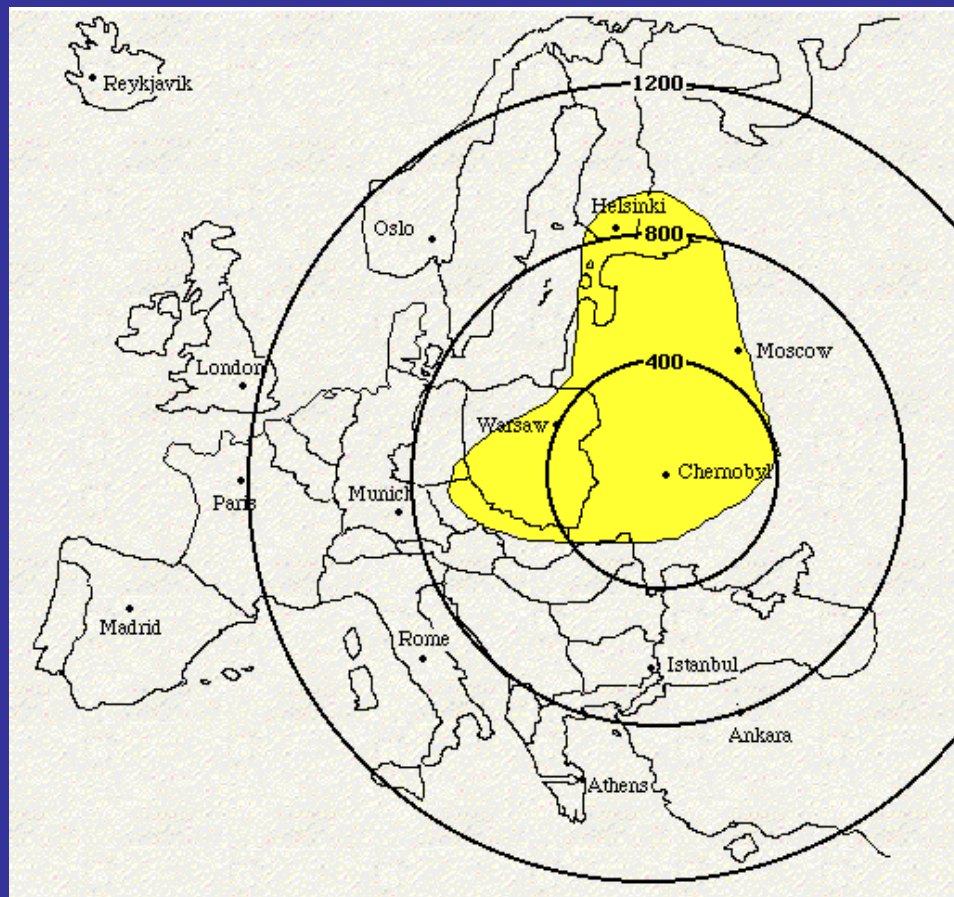
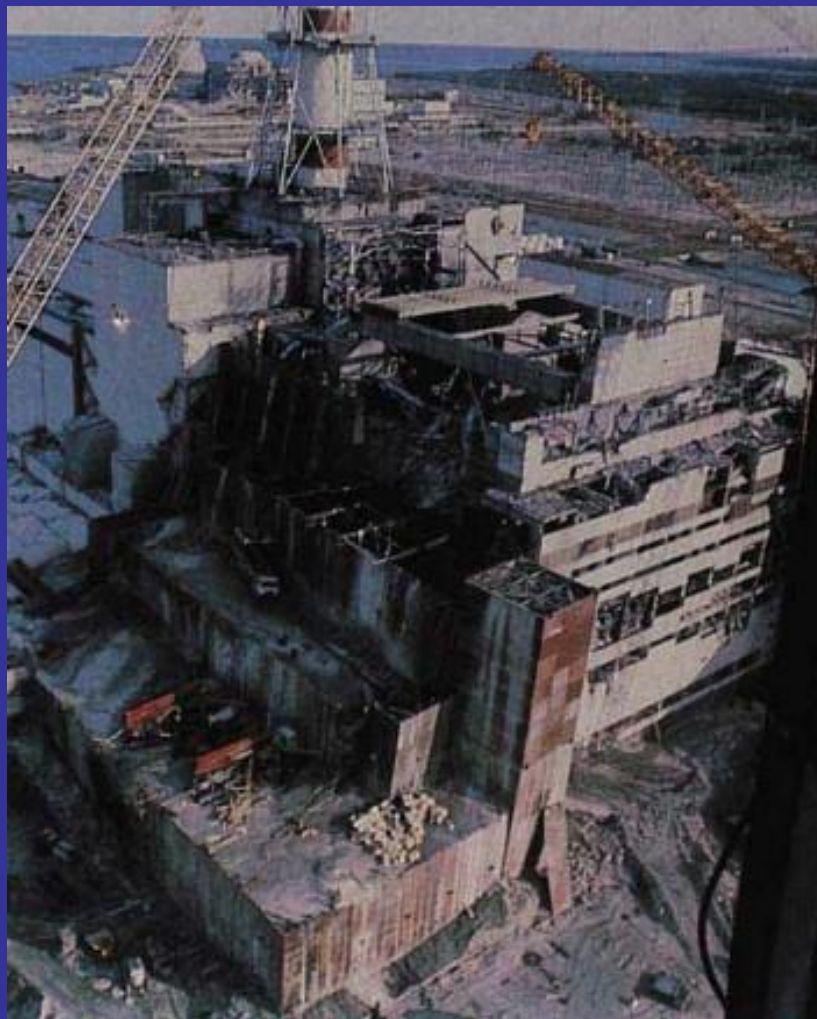
$$A(t) = A(0) e^{-(t/T_R + t/T_B)}$$

$T_R$ : periodo de desintegración,  $T_B$ : periodo biológico

# Periodos de desintegración y biológico

Isótopo	T-radiact.(d)	T-biolog.(d.)	Órgano
Sr-90	9100	18000	Hueso
Cs-137	11000	140	Hueso
I-131	8	138	Tiroides
C-14	2100000	10	Cuerpo
Pu-239	8900000	73000	Hueso
Na-24	0.62	29	Cuerpo

# Chernobyl, 26 de Abril de 1986



## Anuncio de Mijail Gorbachov, 14 de Mayo de 1986

- *“En la noche del 25 al 26 de abril, y durante la planificada puesta fuera de servicio del generador número 4 de la Central nuclear de Chernobyl, aumentó súbitamente la potencia del reactor. La descarga considerable de vapor y la reacción subsiguiente condujo a la formación de hidrógeno, su explosión, la destrucción del reactor y la emisión radiactiva subsiguiente...”*

# Fallos en diseño

- 4 reactores RBMK-1000 (1000 MWe) en la central.
  - RBMK: moderados por grafito y ref. por agua, **mala combinación** (El Zr de los tubos se oxida en vapor liberando H, explosivo en aire).
  - **Alimentación positiva**, el agua actúa mucho más como veneno que como moderador. Si aumenta la T, aumenta la reactividad.
  - Barras de los controladores acababan en desplazadores de grafito **demasiado cortos** (ya corregido en los reactores que quedan).

# Operaciones previas al experimento

- Experimento: *cuanto tiempo seguían funcionando las turbinas sin aporte de vapor* (para comprobar que la inercia de las mismas generaba energía eléctrica para mantener refrigeración hasta que los generadores Diesel hicieran funcionar las bombas de emergencia)
- 1000 MWe equivalen a 3200 MWt, funcionamiento usual para abastecer a la región. No se quiso apagar el reactor, para evitar tener que esperar un mes para su reencendido (envenenamiento por Xe)
- Se redujo la potencia a 1600 MWt la noche anterior (1 AM del 25 de Abril).

## 2:00 PM, 25 de Abril

- Se desconecta el sistema de refrigeración de emergencia, como parte del experimento.
- Por necesidades de suministro, se dieron instrucciones para posponer el experimento hasta las 11:10 PM
- Se mantuvo el reactor trabajando a esa baja potencia inusual.



# 11:10 PM, 25 de Abril

- Se pretendía reducir la potencia entre 700-1000 MWt.
- Por error, se produjo una sobrerreducción hasta 30 MWt.
- Tuvieron que desconectar algunos sistemas automáticos de protección que hubieran detenido el reactor.
- Comenzó a producirse envenenamiento por Xe, al faltar neutrones para transmutarlo y seguirse produciendo por desintegración del Te-125.
- Hubo que retirar muchas barras de control (más que las que hubieran permitido los sistemas de seguridad) para conseguir elevar la potencia a 200 MWt.
- Condiciones inusuales en ese momento:
  - Potencia menor de la planeada
  - Margen de seguridad mínimo con muchas barras retiradas
  - Sistemas de seguridad desactivados

# 1:23 PM, 26 de Abril

- Comienza el experimento.
- Se cierra la primera válvula, reduciendo el aporte de vapor.
- El flujo de agua se inestabilizó, produciendo una refrigeración extra, que redujo reactividad.
- El sistema automático de las barras de control hizo que más rodillos se retiraran.
- A continuación se redujo el flujo de agua y se produjo vapor en el núcleo.
- Éste aumentó la reactividad y produjo más sobrecalentamiento.
- La potencia sube a 1500 MWt de golpe.

## 36 segundos después ...

- Se intenta una parada de emergencia
- El efecto inmediato de la inserción de rodillos es un aumento de la reactividad
- La temperatura hizo que se deformaran los canales
- Los rodillos no pudieron entrar
- El reactor estaba en funcionamiento supercrítico
- El agua de los tubos se convirtió en vapor y reventó una tubería del circuito primario
- El contacto del vapor con el grafito y el circonio liberó hidrógeno
- Se produjo una explosión y posteriores incendios

# Consecuencias

- La falta de edificio de contención produjo liberación de material del reactor a la atmósfera en forma de cenizas.
- El esfuerzo heroico de los bomberos (ocho murieron por efectos directos de la radiación) consiguió que no se propagase el incendio a los otros reactores.
- Los bomberos lanzaron desde helicópteros compuestos de boro para absorber neutrones y a continuación otros materiales de construcción que redujeron enormemente la emisión e material radiactivo
- Tardaron mucho en tomarse medidas sobre la población

# Consecuencias

- 31 muertes, una debida a una explosión, una segunda debida a una trombosis, una más debida a quemaduras y 28 debidas a las radiaciones (todos personal y bomberos).
- 500 hospitalizados
- 135000 evacuados
- Ambigüedades en efectos latentes (cáncer, leucemia y efectos genéticos)
- El efecto de la radiación en países a 800 km fue como el de una radiografía de tórax

# Informe de UNSCEAR

Table D24. Predictions of background and excess mortality from solid cancers and leukaemia in populations exposed as a result of the Chernobyl accident (based on reference [C1])

<i>Population</i>	<i>Population size and average dose</i>	<i>Cancer type</i>	<i>Period</i>	<i>Background cancer mortality</i>	<i>Predicted excess cancer mortality</i>	<i>AF<sup>B</sup> (%)</i>
Emergency and recovery operation workers (liquidators), 1986–1987	200 000 100 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	41 500	2 000	5
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	800	200	20
			First 10 years	40	150	79
Evacuees from 30-km zone	135 000 10 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	21 500	150	0.7 <sup>b</sup>
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	500	10	2
			First 10 years	65	5	7
Residents of SCZs <sup>c</sup>	270 000 50 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	43 500	1 500	3
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	1 000	100	9
			First 10 years	130	60	32
Residents of other contaminated areas	6 800 000 7 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	800 000	4 600	0.6
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	24 000	370	1.5
			First 10 years	3 300	190	5.5

# ¿Hemos aprendido de Chernobyl?

- Reparación de fallos de diseño, consiguiendo alimentación negativa.
- Un reactor debe detenerse ante cualquier anomalía
- Debe comunicarse cualquier incidente
- Evacuación preventiva
- Medidas preventivas

# Fukushima, marzo de 2011

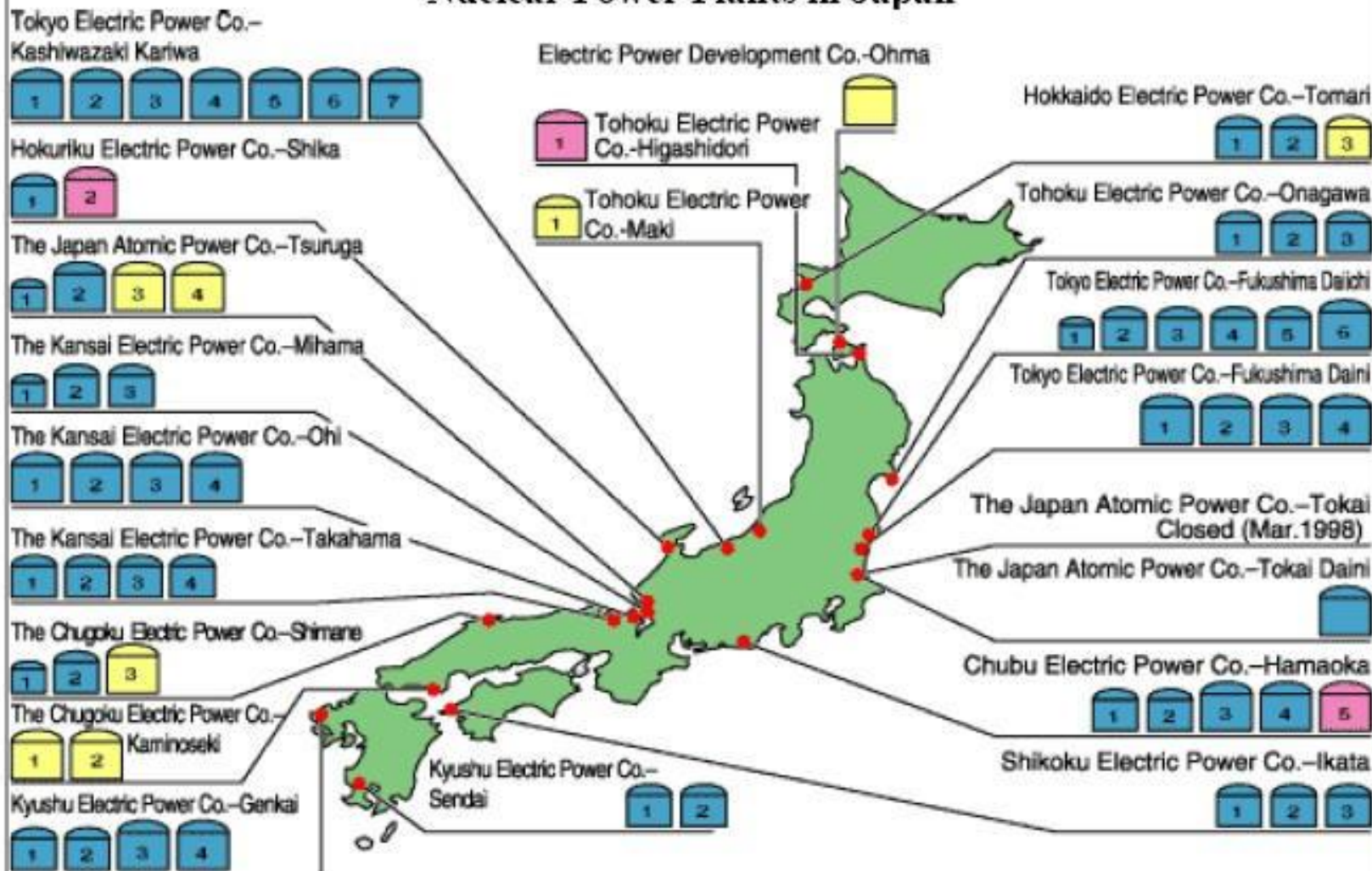




# 11 de marzo, día 1, 09:30 CET




- La IAEA (Servicio de Incidentes y Emergencias) recibe información del terremoto de magnitud 8.9 cerca de la costa de Honshu
- Se informa que las cuatro plantas nucleares más próximas (**Onagawa, Fukushima-Daiichi, Fukushima Daini y Tokai**) han cesado su actividad de forma segura.
- Se produce una alerta de Tsunami para 50 países, hasta América Central.

# Nuclear Power Plants in Japan



## Output scale



-  Operating
-  Under construction
-  Preparing for construction

	Number of Units	Total Output (MW)
Operational	52	45,742
Under construction	3	3,838
Preparing for construction	8	10,315
<b>Total</b>	<b>63</b>	<b>59,895</b>

## Dia 1, 12:45 CET

- La IAEA recibe información de estado de alerta en **Fukushima Daiichi**
- Se informa que un fuego en **Onagawa** ha sido apagado.
- La IAEA solicita información de plantas nucleares, sistemas de refrigeración, y de otras fuentes radiactivas, incluidas las médicas.
- La WMO informa que los **vientos** predominantes viajan dirección este, fuera de la costa japonesa.

## Día 1, 17:55 CET

- Las autoridades japonesas informan de:
  - Evacuación de un radio de **3 km** de la central Daiichi.
  - Permanencia en interior de las personas en un radio de **10 km**.
- Se informa que no hay fugas radiactivas por el momento.

Figura 2.1  
Zonas de planificación de emergencias

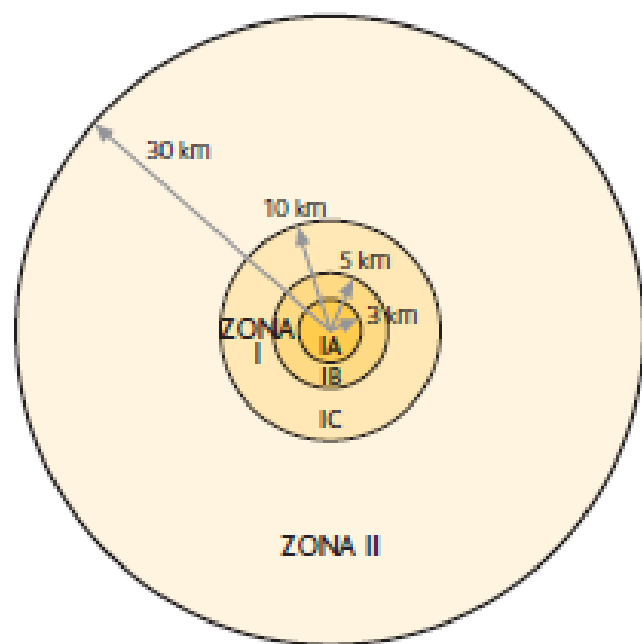
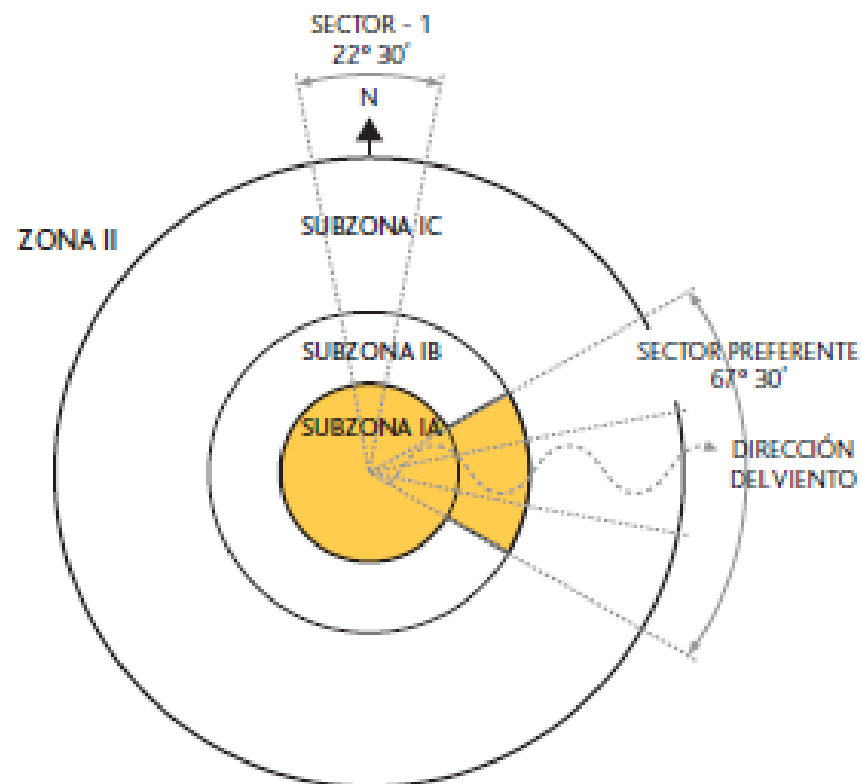


Figura 2.2  
Sector circular y zona de atención preferente



Fuente: Boletín Oficial del Estado, núm. 169, 14/07/2004

# Día 1, 21:30 CET

- Las autoridades japonesas informan de:
  - El terremoto + tsunami ha producido un **corte en la red eléctrica** que abastece a la planta de Daiichi
  - La inundación provocada por el tsunami ha dejado **inservibles los generadores Diesel** de emergencia que alimentan la refrigeración. Se trata de restaurar su funcionamiento.
- Se declara:
  - **Emergencia nuclear** en Daiichi
  - **Estado de alerta** en Daini

# Día 1, 22:10 CET

- Las autoridades japonesas informan de:
  - La **presión del vapor** en el reactor 1 de Daiichi está aumentando.
  - Se procederá a **ventilarlo controladamente** con un filtro para evitar fugas de radiación.
  - Han llegado generadores móviles.
  - Los reactores 1, 2 y 3 (los que estaban en funcionamiento en el instante del terremoto) tienen el nivel del agua por encima del combustible.

# 12 de marzo, día 2, 07:30 CET

- Se informa del comienzo del **vaciado** controlado de vapor del reactor 1.
- Se ha procedido a la evacuación de un radio de **10 km.**
- Se produce una explosión en el reactor 1.



## Día 2, 12:40 CET

- Se informa de las medidas:
  - Se extiende el radio de evacuación de **Daiichi** a **20 km.**
  - Se ordena la evacuación de **Daini** en un radio de **10 km.**
  - Preparativos para la distribución de yoduro potásico entre la población del área.
- La IAEA reitera su oferta de asistencia técnica.

## Día 2, 21:10 CET

- Se informa de que la explosión ocurrió fuera de la vasija principal del reactor 1.
- La vasija se encuentra intacta.
- Como contramedida para limitar daños al núcleo, la empresa TEPCO propone inyectar agua del mar borada en dicha vasija principal.
- Aprobado por la NISA, se procede a las 12:00 CET (20:20 local)
- 4 trabajadores están heridos por la explosión
- Se detecta la presencia de Cs-137 e I-131 en la proximidad del reactor, decayendo la radiactividad en unas horas.

# 13 de marzo, día 3, 03:35 CET

- Se informa erróneamente de labores de ventilación en Daini (corregido)
- Los reactores 1, 2 y 4 de Daini mantienen corriente eléctrica, mientras que el número 3 se mantiene frío y apagado.
- En Daini ha muerto un trabajador por un accidente con una grúa y cuatro han quedado heridos.
- En Daiichi un trabajador ha quedado expuesto a niveles de radiación por encima de lo normal.
- Los vientos se dirigen al noreste, fuera de la costa.

## Día 3, 13:35 CET

- Se informa de la extracción controlada de vapor del reactor 3
- Inyección de agua de mar.
- Se cree que es posible la acumulación de hidrógeno en el reactor.
- Estado de emergencia en la planta de Onagawa

## Día 3, 23:30

- Los niveles de radiactividad en Onagawa son normales
- Situación en Fukushima Daiichi:
  - Reactor 1: alimentado por generadores portátiles. Inyección de agua de mar. Edificio de contención afectado
  - Reactor 2: alimentado por generadores portátiles. Enfriamiento mediante reemplazamiento de agua del núcleo con baterías.
  - Reactor 3: Niveles de agua reducidos. Ventilación controlada. Se trata de reducir el contenido en hidrógeno en el edificio de contención

14 de marzo, día 4, 04:00 CET

- Se informa de una explosión en el reactor 3.
- En Fukushima Daini, los cuatro reactores se encuentran parados y fríos.

## Día 4, 07:00 CET

- La explosión en la unidad 3 fue de hidrógeno.
- Seis personas han resultado heridas.
- La vasija del reactor está intacta.

## Día 4, 15:35 CET

- El reactor 2 presenta niveles bajos de refrigerante.
- Se le suministra agua de mar.
- Evacuación: 20 km de Daiichi y 10 km de Daini.
- 185000 evacuados a 13 de marzo.
- 230000 unidades de yoduro distribuidas (sin ser administradas).



15 de marzo, día 5, 03:35 CET

- Reactores 1,2 y 3 en Daini están fríos y apagados.
- Tratando de restaurar enfriamiento en reactor 4

## Día 5, 06:15 CET

- Explosión en la unidad 2.
- Fuego en la piscina del reactor 4 con emisión radiactiva a la atmósfera, debida a una explosión de hidrógeno.
- Máxima medición de 400 mSv/h en un punto e instante concretos.
- Todo el personal no esencial sale de la planta.

## Día 5, 07:35 CET

- Fuego extinguido en piscina del reactor 4.
- Niveles de radiación tomadas cada seis horas en las puertas de la central: 11.9 mSv/h, 0.6 mSv/h.
- Instrucciones a la población de permanecer en casa en un radio de 30 km.
- Instrucciones de no volar en una región de 30 km.
- Todas las unidades en Daini, Onagawa y Tokai están **paradas y frías**.

# 16 de marzo, día 6, 15:55 CET

- Preocupación por niveles de agua en piscinas reactores 3 y 4.
- Helicópteros y mangueras arrojan agua de mar a los reactores 3 y 4, retirando previamente restos de la explosión.
- El nivel de agua de la piscina del reactor 5 ha descendido 40 cm (sigue 2 m por encima de las barras). Se emplea un generador diesel de la unidad 6 para refrigeración.

## Día 6, 23:35 CET

- Piscina unidad 4 a 84° C, unidades 5 y 6 a 60° y descendiendo.
- Estado de los trabajadores: 21 heridos por las explosiones, 2 enfermos, 2 desaparecidos, 19 descontaminados (solo uno evacuado).

17 de marzo, día 7, 13:35 CET

- Se tira una línea eléctrica externa al reactor 2.
- Se inyecta agua en reactor 2.
- Se concluye el vertido de agua al reactor 3.

# 18 de marzo, día 8, 15:00 CET

- Situación reactores 1,2 y 3 estable.
- Preocupación temperatura del agua piscinas reactores 3 y 4.
- Medidas de radiación en 47 ciudades japonesas. Niveles en Tokio insignificantes (sin trazas de I-131 o Cs-137)
- Nuevos niveles de emergencia declarados:
  - Daños reactores 1,2 y 3: escala INES 5.
  - Piscina del reactor 4: escala INES 4.

Nivel de la INES	Personas y medio ambiente	Barreras y controles radiológicos	Defensa en profundidad
<b>Accidente grave</b> Nivel 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liberación grave de materiales radiactivos con amplios efectos en la salud y el medio ambiente, que requiere la aplicación y prolongación de las contramedidas previstas.</li> </ul>		
<b>Accidente importante</b> Nivel 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liberación importante de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de las contramedidas previstas.</li> </ul>		
<b>Accidente con consecuencias de mayor alcance</b> Nivel 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liberación limitada de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de algunas de las contramedidas previstas.</li> <li>Varias defunciones por radiación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daños graves en el núcleo del reactor.</li> <li>Liberación de grandes cantidades de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de exposición del público; provocada posiblemente por un incendio o un accidente de criticidad grave.</li> </ul>	
<b>Accidente con consecuencias de alcance local</b> Nivel 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liberación menor de materiales radiactivos, con escasa probabilidad de tener que aplicar las contramedidas previstas, salvo los controles locales de alimentos.</li> <li>Al menos una defunción por radiación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fusión de combustible o daño al combustible, que provoca una liberación superior al 0,1% del inventario del núcleo.</li> <li>Liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de importante exposición del público.</li> </ul>	
<b>Incidente importante</b> Nivel 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exposición diez veces superior al límite anual establecido para la exposición de los trabajadores.</li> <li>Efecto no letal de la radiación en la salud (p. ej. quemaduras).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tasas de exposición superiores a 1 Sv/h en una zona de operación.</li> <li>Contaminación grave en una zona no prevista en el diseño, con escasa probabilidad de exposición importante del público.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuasi accidente en una central nuclear sin disposiciones de seguridad pendientes de aplicación.</li> <li>Pérdida o robo de fuentes selladas de radiactividad alta.</li> <li>Entrega equivocada de fuentes selladas de radiactividad alta, sin que existan procedimientos adecuados para manipularlas.</li> </ul>
<b>Incidente</b> Nivel 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exposición de una persona del público por encima de 10 mSv.</li> <li>Exposición de un trabajador por encima de los límites anuales reglamentarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niveles de radiación superiores a 50 mSv/h en una zona de operación.</li> <li>Contaminación importante dentro de una instalación en una zona no prevista en el diseño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fallos importantes en las disposiciones de seguridad, aunque sin consecuencias reales.</li> <li>Hallazgo de una fuente sellada huérfana, de un dispositivo o de un embalaje para el transporte de radiactividad alta, con indicación de las disposiciones de seguridad, sin que haya habido menoscabo.</li> <li>Embalaje inadecuado de una fuente sellada de radiactividad alta.</li> </ul>
<b>Anomalía</b> Nivel 1			<ul style="list-style-type: none"> <li>Sobreexposición de una persona del público por encima de los límites anuales reglamentarios.</li> <li>Problemas menores en componentes de seguridad, con importantes medidas de defensa en profundidad pendientes de aplicación.</li> <li>Pérdida o robo de fuentes radiactivas, de dispositivos o de embalaje para el transporte de actividad baja.</li> </ul>

SIN SIGNIFICACIÓN PARA LA SEGURIDAD (Debajo de la escala/Nivel 0)



## 19 de marzo, día 9.

- Reactores 1, 2 y 3: cubierto por agua la mitad del combustible (daños en las barras).
- Continúan los trabajos de enfriamiento. Sigue saliendo humo.
- Se abren agujeros en el edificio de los reactores 5 y 6 para prevenir acumulación de hidrógeno.

## 21 de marzo, día 11.

- La situación se va normalizando.
- Persisten emisiones de humo.
- Corriente eléctrica en unidad 2.
- Sigue bombeándose agua en reactores 1,2 y 3 y en las piscinas.
- La presión desciende en reactor 3.
- Tasas de dosis (beta/gamma) en distintas zonas de 2-160 microSv/h (1300h-16h de exposición para igualar dosis naturales anuales).
- No se observa radiación alfa (no actínidos).

Unit	1	2	3	4
Power (MWe /MWth)	460/1380	784/2381	784/2381	784/2381
Type of Reactor	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4
Status at time of EQ	In service – auto shutdown	In service – auto shutdown	In service – auto shutdown	Outage
Core and fuel integrity	Damaged	Damaged	Damaged	No fuel in the Reactor
RPV & RCS integrity	Unknown	Unknown	Unknown	Not applicable due to outage plant status
Containment integrity	Not Damaged	Damage suspected	No information	
AC Power	Substation connected	<u>AC Power available – Load check is ongoing</u>	Not available	Not available
Building	Severe damage	Slight damage	Severe damage	Severe damage
Water level of RPV	Around half of Fuel is uncovered (Stable)	Around half of Fuel is uncovered (Stable)	Around half of Fuel is uncovered (Stable)	Not applicable due to outage plant status
Pressure of RPV	Stabilized	Unreliable Readings	<u>Decreased</u>	
CV Pressure Drywell	Stable	Stable	<u>Decreased</u>	
Water injection to RPV	Seawater	Seawater	Seawater	
Water injection to CV	No information	No information	No information	
Spent Fuel Pool Status	No information	<u>Periodic spraying from outside</u>	<u>Periodic spraying from outside</u>	<u>Periodic spraying from outside</u>

## 23 de marzo, día 13.

- Medidas contaminación espinacas: 55000 Bq/kg (normales de 2000 Bq/kg).
- Niveles menores, aunque sobre los valores normales, en leche y agua del grifo.
- Se prohíbe el procesado y comercialización de alimentos de la zona.
- Niveles de contaminación en leche
- Niveles de radiación descendiendo (0.2-6.9 microSv/h.)

## 23 de marzo, día 13.

- Llega segunda unidad de apoyo de la IAEA
- Situación de los reactores mejorando.
- Corriente eléctrica externa en los cuatro reactores.
- Sigue la central en alerta, e inyectándose agua en los reactores y piscinas.
- Niveles de radiactividad por encima de lo normal en el agua del mar en las proximidades de los vertidos de la central (antes de disolverse en el océano).

# Chernobyl vs Fukushima

	Chernobyl	Fukushima
Motivo	Fallos humanos	Desastre natural
Suceso	Explosión de H en núcleo del reactor	Explosiones de H en edificio de contención
Material radiactivo expuesto	Productos de fisión y actínidos del interior de las barras	Elementos volátiles que se filtran del interior de las barras
Tasa de dosis dentro de la central	varios Sv/h	decenas de mSv/h
Muertos por radiación directa	31 muertos	Ninguno (de momento)
Medidas preventivas	A los 14 días	Antes de las explosiones
Objeciones	Al experimento	Localización de la central

# Costes de una central nuclear

- U muy abundante y relativamente barato.
- Costes elevados sistemas de seguridad y tratamiento de residuos.
- Precio por kWh ligeramente mejor que el del carbón, petróleo o gas natural, sin coste emisiones de CO<sub>2</sub>
- Energía eléctrica *estable* y mantenida
- Buena opción sin ser la panacea.
- Posiblemente no sea tan mala como piensan sus detractores