

Controversia nuclear



Juan José Gómez Navarro
Departamento de Física

Índice

1. El debate nuclear
2. Ventajas de la energía nuclear
3. Inconvenientes de la energía nuclear
4. Accidentes nucleares
5. El futuro de la energía nuclear

1. El debate nuclear

- ✓ El debate en torno a la energía nuclear está muy polarizado (y lleno de prejuicios), los anti/pro-nucleares esgrimen poderosos argumentos: algunos irrefutables, muchos discutibles, algunos erróneos
- ✓ Las **grandes ventajas** de la energía nuclear sólo son ensombrecidas por sus igualmente **grandes inconvenientes**
- ✓ La impresionante estadística de **seguridad** en torno a la industria nuclear queda empañada por las graves consecuencias de los **accidentes nucleares**

1. El debate nuclear

- ✓ Cualquier actividad humana entraña riesgos
- ✓ La Física Nuclear es una ciencia bien establecida, no es Magia
- ✓ Por otro lado, al final es un negocio que ha de ser rentable, y la seguridad es cara
- ✓ La clave es la **evaluación de los riesgos y beneficios**, y determinar si son o no asumibles
- ✓ **La energía nuclear ha de ser respetada desde el conocimiento, no temida desde la ignorancia**



FE CIEGA

Porque pensar por uno mismo es muy difícil.

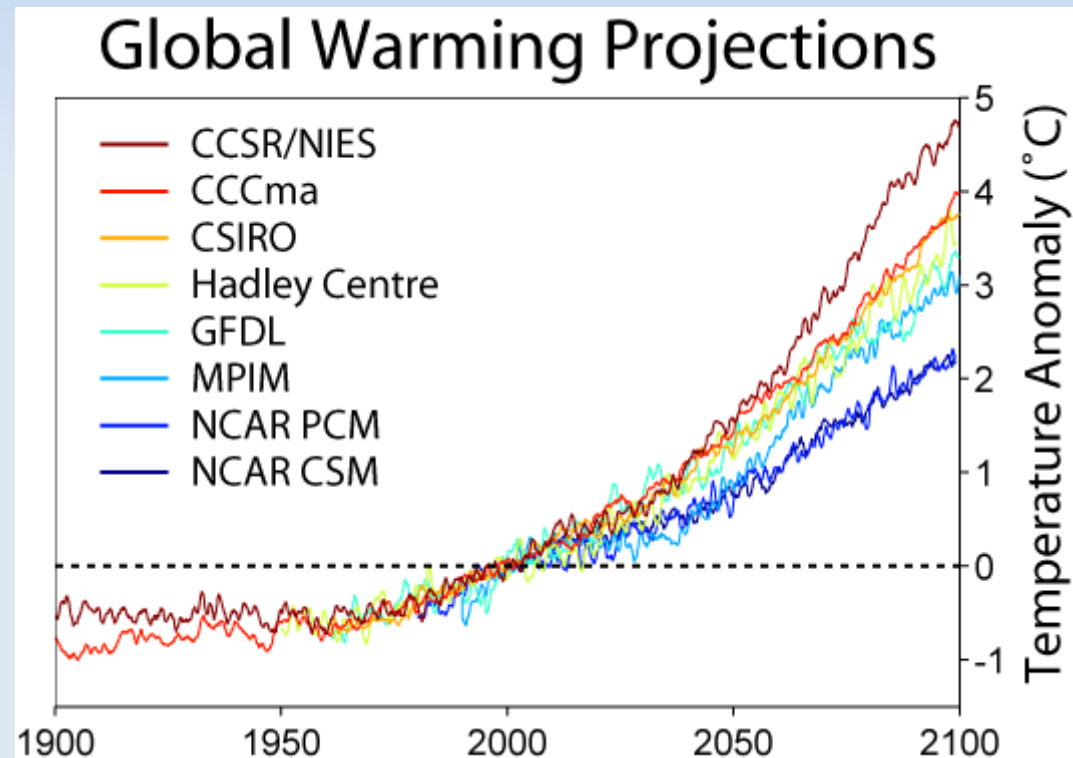
2. Ventajas de la energía nuclear

- ✓ Estadísticamente, la energía nuclear es **tremendamente segura**
- ✓ Incluyendo los accidentes de Chernóbil y Fukushima, las muertes producidas por la industria nuclear son las más bajas de la industria
- ✓ En particular, en Fukushima I han muerto 5 personas (por causas ajenas a la radiación)
- ✓ Estas estadísticas están condicionadas por la tremenda regulación y vigilancia a que está sometida esta industria

Energy Source	Death Rate (deaths per TWh)
Coal - world average	161 (26% of world energy, 50% of electricity)
Coal - China	278
Coal - USA	15
Oil	36 (36% of world energy)
Natural Gas	4 (21% of world energy)
Biofuel/Biomass	12
Peat	12
Solar (rooftop)	0.44 (less than 0.1% of world energy)
Wind	0.15 (less than 1% of world energy)
Hydro	0.10 (europe death rate, 2.2% of world energy)
Hydro - world including Banqiao)	1.4 (about 2500 TWh/yr and 171,000 Banqiao dead)
Nuclear	0.04 (5.9% of world energy)

2. Ventajas de la energía nuclear

- ✓ Uno de los problemas actuales más serias desde el punto de vista ecológico es el calentamiento global
- ✓ La industria nuclear no libera prácticamente **gases de efecto invernadero**
- ✓ Pocos residuos y muy bien confinados
- ✓ Una parte no despreciable del movimiento ecologista está a favor
- ✓ Es una de las alternativas más serias a los combustibles fósiles

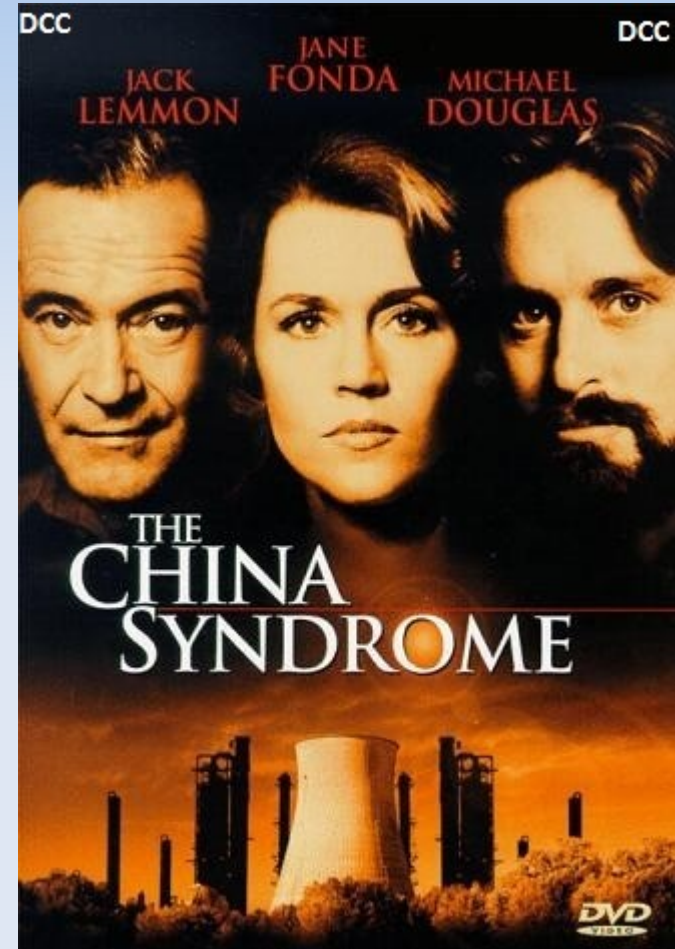


2. Ventajas de la energía nuclear

- ✓ Hoy en día el 14% de la energía eléctrica producida a nivel mundial es de origen nuclear
- ✓ La demanda energética no deja de crecer
- ✓ Se trata de una fuente de energía estable, fiable y barata (esto último es discutible)
- ✓ Muchos países no disponen de recursos propios, y depende fuertemente de la energía nuclear (Japón es un claro ejemplo)
- ✓ Se estima que en 2030 sólo el 6% de la energía mundial será de recursos renovables
- ✓ A día de hoy, no es realista desconectar las centrales nucleares si queremos asegurar el nivel de vida de la humanidad

2. Ventajas de la energía nuclear

- ✓ La energía nuclear es tremenda e irracionalmente impopular, y sobre ella se han dicho muchas mentiras
- ✓ Las noticias de Japón han demostrado cómo “lo nuclear” vende titulares
- ✓ La sociedad tiende a asociar energía nuclear a armas nucleares, pero la realidad es que sólo 8 países en el mundo son capaces de crear armas nucleares, de los 30 que disfrutan de centrales nucleares (como España)



El síndrome de china (1979), se estrenó unos días antes del primer accidente nuclear popularmente conocido

3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ Por supuesto, la energía nuclear tiene una importante serie de inconvenientes
- ✓ La energía nuclear **no es renovable** (si bien se puede regenerar usando reactores rápidos y durar miles de años, según algunos cálculos)
- ✓ Se argumenta que si se incluyen los costos de gestionar los residuos hasta su deposición definitiva (así como desmantelar la central), **no es rentable**
- ✓ Son **objetivos claros** frente a ataques militares y terroristas
- ✓ Pero el principal inconveniente está asociado a la **contaminación radiológica**

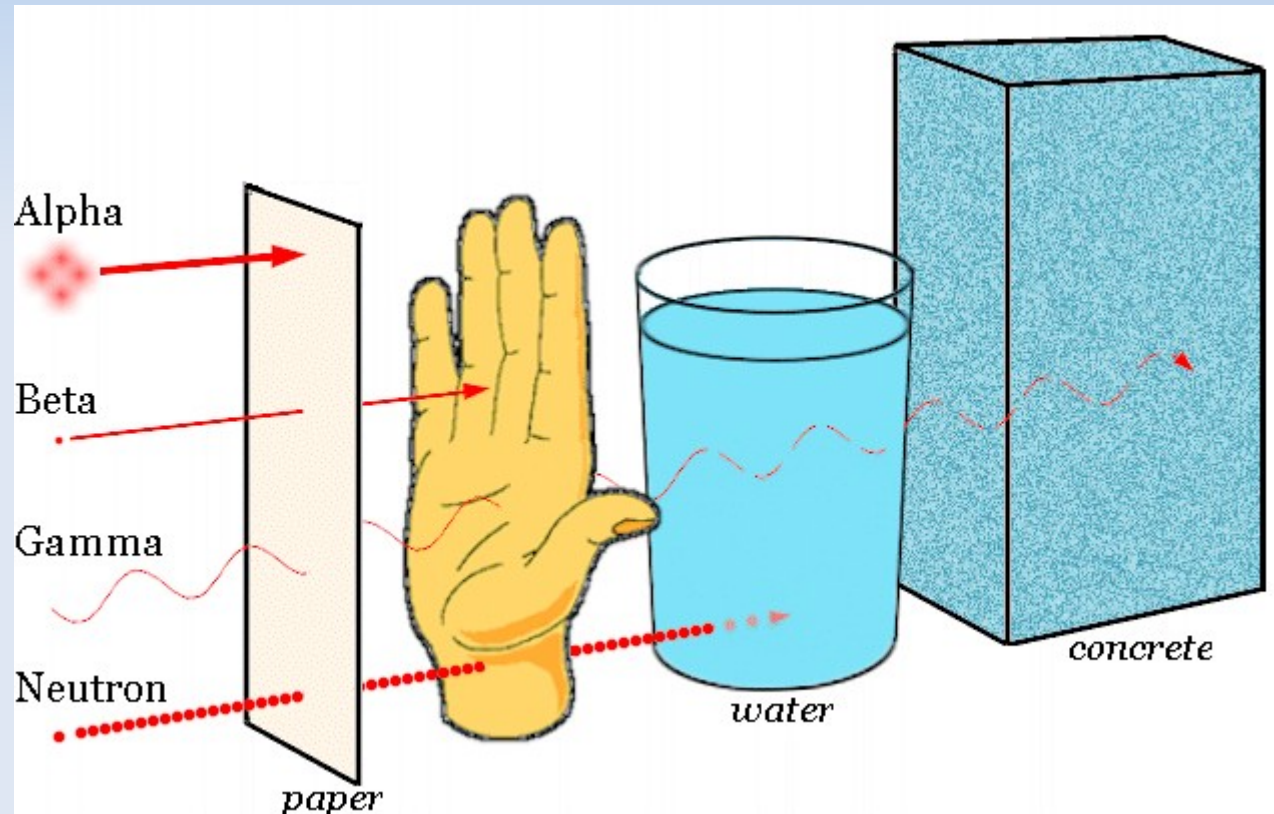
3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ La radiación se produce por la fisión de elementos pesados, que liberan una gran cantidad de energía
- ✓ La cantidad de radiación que emite un elemento (actividad) depende de la cantidad de material y de su periodo de semidesintegración
- ✓ La radiación capaz de producir daños es la **ionizante**. La radiación no ionizante, como la de los dispositivos electrónicos, no puede dañar los tejidos



3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ Hay diferentes tipos de radiación ionizante: alfa, beta, gamma y neutrónica
- ✓ Cada tipo de radiación posee diferente capacidad de penetración, que afecta a su peligrosidad



3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ Hay múltiples maneras de medir la radiactividad:
- ✓ Unidades físicas:
 - Un **Bequerelio**: es una desintegración por segundo
 - Un **Curie**: son 37 millones de desintegraciones por minuto
- ✓ Unidades biofísicas (dosis absorbida):
 - Un **Gray**: un Julio por kilogramo de material biológico (1 Gy = 100 **rad**)
- ✓ Unidades de dosis equivalente (tienen en cuenta el tipo de radiación):
 - ✓ Un **Sievert** es un Gray corregido por un factor (1 para radiación gamma, 20 para alfa, etc, ...)



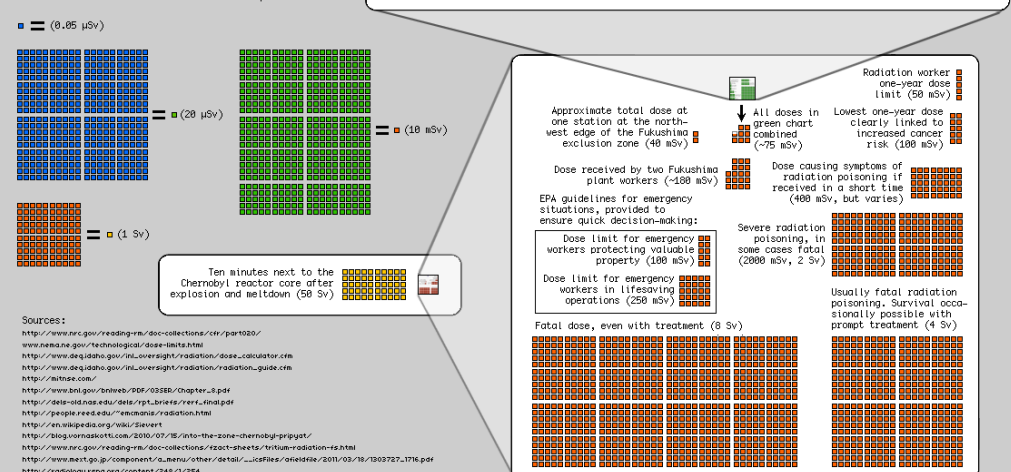
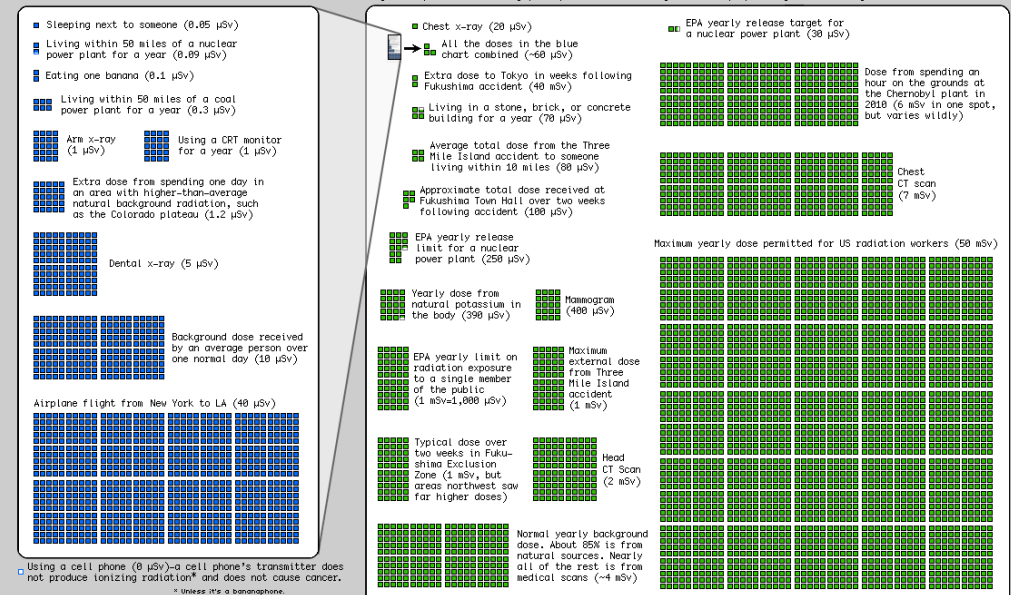
3. Inconvenientes de la energía nuclear

<http://xkcd.com/radiation/>

- ✓ Algunos ejemplos:
- ✓ **50 Sv**: 10 minutos al lado del reactor de Chernóbyl tras la explosión
- ✓ **5 Sv**: más de eso te mata sin remedio
- ✓ **1 Sv**: te pone enfermo
- ✓ **0.1 Sv**: mínima dosis que se sabe que está relacionada con el cáncer
- ✓ **5 mSv**: dosis media anual por radiación natural
- ✓ **1 m Sv**: dosis tras vivir 2 semanas en la zona de exclusión de Fukushima en el momento cumbre del accidente

Radiation Dose Chart

This is a chart of the ionizing radiation dose a person can absorb from various sources. The unit for absorbed dose is "sievert" (Sv), and measures the effect a dose of radiation will have on the cells of the body. One sievert (all at once) will make you sick, and too many more will kill you, but we safely absorb small amounts of natural radiation daily. Note: The same number of sieverts absorbed in a shorter time will generally cause more damage, but your cumulative long-term dose plays a big role in things like cancer risk.



Sources:
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part1020/>
<http://www.nema.gov/technical/dose-limits.html>
<http://www.deq.state.nj.gov/njswersight/radiation/dose-calculator.htm>
<http://www.deq.state.nj.gov/njswersight/radiation/radiation-guide.htm>
<http://nrc.gov>
http://www.bnl.gov/bnlweb/DOE/DOE/Chapter_8.pdf
<http://deis-018.nrc.gov/deis/rpt/briefs/rev1/final.pdf>
<http://people.reed.edu/~emcmanis/radiation.html>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Sievert>
<http://blog.vrmassett.com/2010/07/18/info-the-zone-chnobyl-prigyet/>
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/radact-sheets/tr/tum-radiation-vs.html>
http://www.merit.go.jp/component/a_menu/other/detail/_contents/010103/18/1303727_1716.pdf
<http://radiology.rma.org/content/246/1/254>

Chart by Randall Munroe, with help from Ellen, Senior Reactor Operator at the Reed Research Reactor, who suggested the idea and provided a lot of the sources. I'm sure I've added in lots of mistakes; it's for general education only. If you're basing radiation safety procedures on an internet PNG image and things go wrong, you have no one to blame but yourself.

3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ La radiación produce **daños directos** y **daños indirectos**
- ✓ Los daños **directos** son quemaduras y destrucción celular (síndrome radiactivo agudo).
- ✓ Sólo ocurre con exposiciones por encima de 0.5 Sv
- ✓ Los daños **indirectos** están asociados al aumento de casos de cáncer y problemas en el desarrollo
- ✓ Son impredecibles (estocásticos), y no está claro por debajo de qué nivel de exposición los efectos de la radiación son despreciables ($\sim 5 \mu\text{Sv}$)

3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ La peligrosidad de un isótopo depende también de su **volatilidad**
- ✓ Los isótopos volátiles (gaseosos a temperatura ambiente) escapan más fácilmente, pero se dispersan, limitando su peligrosidad
 - **Radón-222**: es un gas noble natural que se acumula en espacios cerrados. Causa ~ 20000 muertes al año en EEUU
 - **Yodo-131**: el yodo se tiende a acumular en la glándula tiroides. En Chernóbil se relaciona con un aumento de casos de cáncer
 - **Cesio-137**: tiene un periodo de semidesintegración mayor. No tiende acumularse en áreas específicas del cuerpo
- ✓ Los no volátiles (**Uranio, Plutonio, Estroncio, Tecnecio,...**) son más peligrosos porque no se dispersan, y penetran en las capas freáticas.
- ✓ **Una de las diferencias fundamentales desde el punto de vista ambiental entre Fukushima y Chernóbil**

3. Inconvenientes de la energía nuclear

✓ Las tres reglas para **protegerse de la radiación**:

• **Distancia**: la intensidad de la radiación decrece rápidamente

• **Blindaje**: interponer materiales densos evita el paso de radiación ionizante (hormigón, acero, agua, ...)

• **Tiempo**: dosis intensas en poco tiempo son peores que menos intensas extendidas en el tiempo

✓ La dosis máxima legal para una trabajadores expuestos a radiación es 100 mSv en 5 años, con un máximo de 50 mSv en un año

✓ El peligro radiológico debido al funcionamiento normal de las centrales nucleares es nulo



Blindaje de plomo en un laboratorio

3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ Un importante inconveniente de las actividades que requieren física nuclear es la generación de **residuos radiactivos**
- ✓ Se clasifican en **baja** (20 mSv/h), **media** (>20 mSv/h) y **alta** actividad (material nuclear gastado)
- ✓ Los residuos de media y baja actividad, que suponen unas 2000 toneladas/año (muchos generados por hospitales y centros de investigación) se introducen en bidones de 220 litros y se llenan de hormigón
- ✓ Los bidones se almacenan en un emplazamiento seguro y vigilado. Estos residuos dejan de ser radiactivos en unas décadas
- ✓ En España se hace en el El Cabril (Córdoba), que se calcula se llenará en 2030, y luego se sellará

3. Inconvenientes de la energía nuclear

- ✓ El uso de reactores nucleares genera **residuos de alta actividad**
- ✓ Se trata de una cantidad pequeña (160 toneladas/año en España), y están perfectamente confinados, si bien son muy peligrosos
- ✓ Se almacenan temporalmente en **piscinas de material gastado**, dentro de las propias centrales
- ✓ En España no hay (todavía) un depósito para almacenar de forma definitiva estos residuos
- ✓ En el futuro, se espera poder reducir su actividad mediante transmutación y reprocesado



4. Accidentes nucleares

- ✓ La física nuclear es una ciencia *joven* pero bien establecida
- ✓ Sin embargo, la tecnología nuclear es enormemente compleja y (afortunadamente) hay poca experiencia sobre cómo manejar situaciones difíciles
- ✓ Los accidentes nucleares son importantes para aprender cómo hacer las instalaciones más seguras, y qué no se debe hacer



4. Accidentes nucleares

- ✓ La escala INES (*International Nuclear Event Scale*) fue introducida en 1990 por la OIEA para mejorar la comunicación al público de las consecuencias de un accidente nuclear



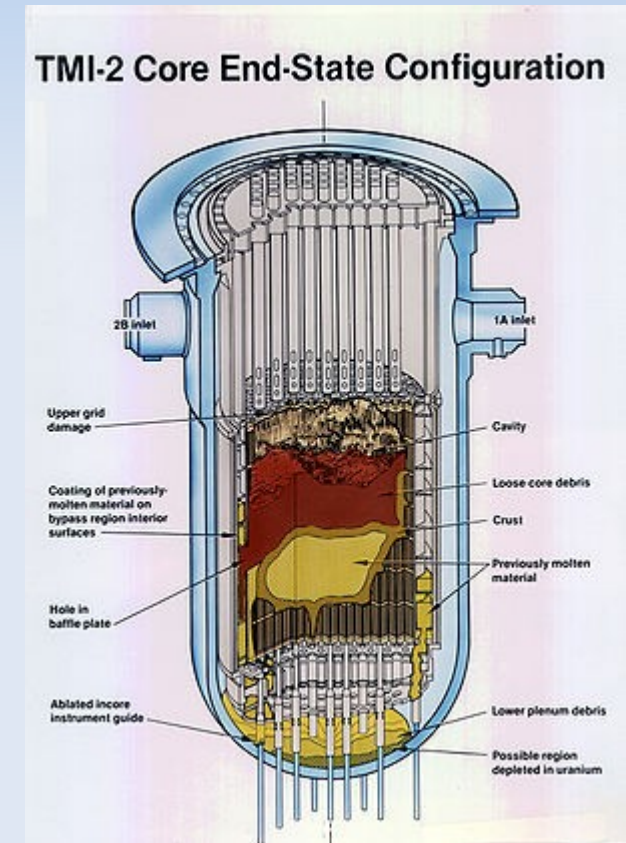
4. Accidentes nucleares

- ✓ En 1979 el reactor 2 de la central Three Mile Island (un PWR) sufrió un LOCA (*Lost of Coolant Accident*), uno de los peores accidentes posibles
- ✓ El problema se originó en un fallo mecánico en la bomba de alimentación en el secundario, que provocó la desconexión del reactor como medida de seguridad
- ✓ La presión comenzó a subir, y se abrió una válvula de escape, que quedó **abierta por error**, vaciando el refrigerador del reactor
- ✓ El reactor quedó sin refrigeración, pero por una combinación de fallos de diseño y falta de adiestramiento, los operarios no lo sabían



4. Accidentes nucleares

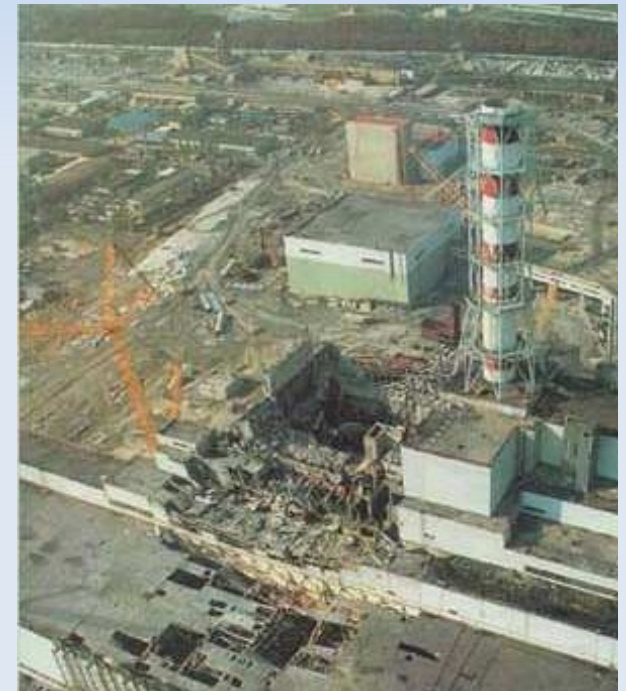
- ✓ Debido a la pérdida de refrigeración, parte del **núcleo se fundió**
- ✓ Afortunadamente los materiales de fisión quedaron contenidos dentro del reactor
- ✓ Se produjo la liberación de gases radiactivos, pero el impacto ambiental fuera de la central fue limitado
- ✓ Fue calificado (restrospectivamente) como accidente de escala 5, y fue el más grave hasta ese momento



Estado final el rector TMI-2

4. Accidentes nucleares

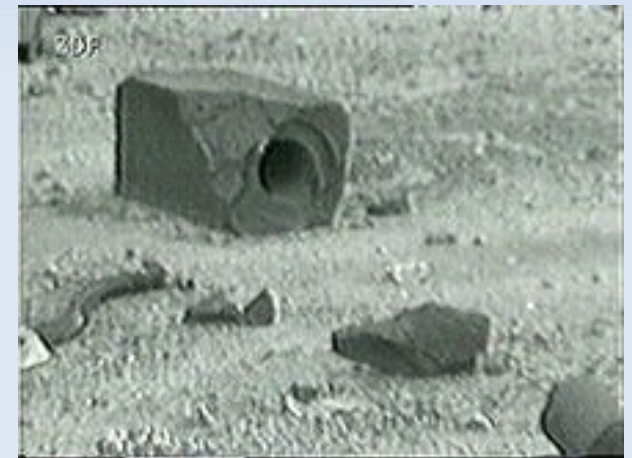
- ✓ El 26 de abril de 1986 ocurrió el peor accidente nuclear de la historia en el reactor N° 4 de la central de **Chernóbil**
- ✓ El detonante fue un experimento para comprobar la capacidad de las turbinas de generar energía en una situación de emergencia
- ✓ Redujeron anómalamente la potencia, y desactivaron negligentemente decenas de medidas de seguridad automáticas (sólo 8 barras de control, el mínimo era 30)
- ✓ El reactor era un RBMK con un gran coeficiente de huecos positivo y barras de control lentas
- ✓ La potencia del reactor aumentó rápidamente (100 veces su valor nominal en unos segundos)
- ✓ Se produjo una explosión de vapor que voló el reactor **dejando expuesto el núcleo fundido**



Aspecto de la central horas después del accidente

4. Accidentes nucleares

- ✓ El **grafito produjo un incendio** que inyectaba material altamente radiactivo a la atmósfera durante varios días
- ✓ Desde el primer momento se subestimó y trató de ocultar el alcance del problema (era el final de la guerra fría)
- ✓ El incendio de grafito se sofocó el primer día, pero a un enorme coste humano por síndrome radiológico agudo (30 bomberos murieron a las pocas horas)
- ✓ Se arrojaron 5000 toneladas de material absorbente de neutrones desde helicópteros, para disminuir la reactividad del núcleo fundido



Fragments del reactor en el techo de la central

4. Accidentes nucleares

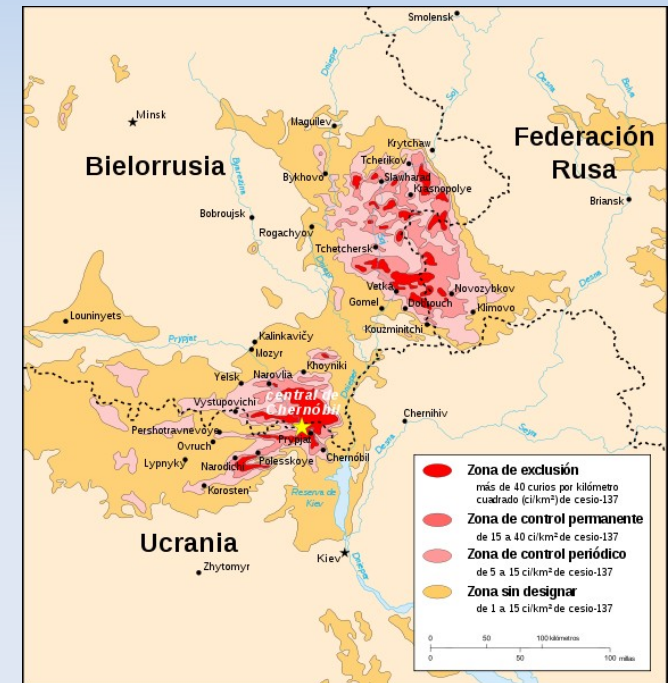
- ✓ Cuando la radiación comenzó a disminuir, se construyó una estructura de hormigón para aislar los materiales del reactor del ambiente
- ✓ Los **liquidadores** recogieron toneladas de escombros radiactivos y los enterraron en los alrededores de la central
- ✓ Esta estructura (“**el sarcófago**”) ha de ser reemplazada por una nueva antes de que se hunda, pero no se terminan de recaudar los fondos necesarios (~ 1500 millones de euros)
- ✓ El núcleo del reactor, aunque aislado, seguirá siendo radiactivo durante miles de años



El “sarcófago”

4. Accidentes nucleares

- ✓ El accidente fue calificado como INES 7, y contaminó gravemente muchas áreas cercanas a la central con materiales no volátiles de largo periodo de semidesintegración
- ✓ Se hubo de reubicar a unas **600 000 personas**
- ✓ El número de afectados varía enormemente en función de las fuentes. Desde 30 muertos directos y un ligero aumento en los casos de cáncer (informe UNESCAR 2000) hasta ~ 100 000 muertos por aumento de casos de cáncer (informe TORCH 2006)
- ✓ Según la OMS, **4000 muertos**, si bien los problemas psicológicos derivados del estrés (y no la radiación) han jugado también un papel fundamental



Área contaminada

4. Accidentes nucleares

- ✓ El accidente de la central **Fukushima I** se originó el 11 de Marzo de 2011, y se declaró bajo control en diciembre
- ✓ Un terremoto de escala 9 seguido de un tsunami de 15 metros arrasó el país
- ✓ La central estaba diseñada para soportar terremotos de escala 8.2, y tsunamis de hasta 6 metros



Aspecto de los 4 reactores
BWR el 16 de marzo de 2011

- ✓ Instantes después acción en cadena, y los generadores diésel mantuvieron la **refrigeración necesaria debida a los subproductos de la fisión**
- ✓ Sin embargo el tsunami posterior destruyó los generadores, y **la central se quedó sin sistema de refrigeración**

4. Accidentes nucleares

- ✓ Más que un accidente, en Fukukshima hay una pérdida total de refrigeración que está dando lugar a una **cadena de accidentes**
- ✓ La situación era mucho más compleja que en Chernóbil
- ✓ En el momento del accidente sólo había 3 reactores funcionando, pero los 6 contienen piscinas de material gastado que también requerían refrigeración
- ✓ Se empezó a refrigerar usando coches de bomberos
- ✓ El nivel de agua bajó en los reactores, lo que dejó expuestas las barras (LOCA), por lo que los núcleos de U1, U2 y U3 empezaron a fundirse
- ✓ Se produjo una reacción química con el zirconio de las vainas del combustible, que libera hidrógeno, que causó las explosiones que volaron los edificios de los reactores, **pero no los reactores propiamente dichos**

4. Accidentes nucleares

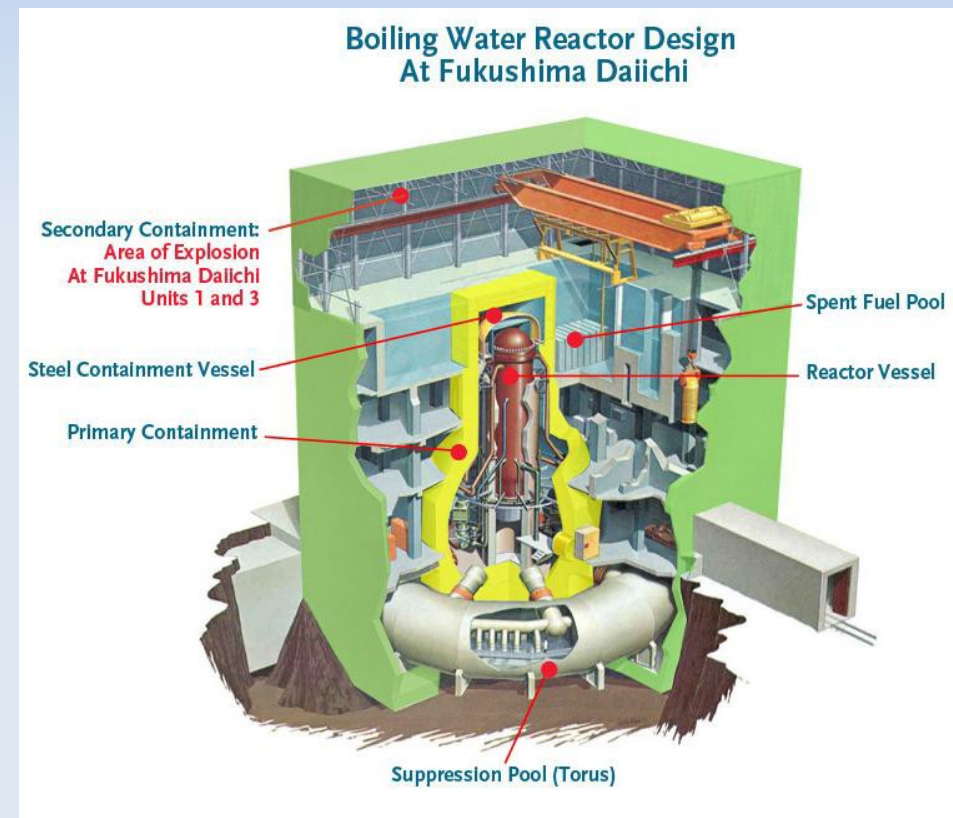
- ✓ Se produjo así mismo un aumento en la presión de la vasija, que se decidió aliviar **evacuando gases radiactivos**. Estos gases son de corta vida media, y se dispersan rápidamente
- ✓ Ante la falta de agua dulce, se decidió inyectar agua de mar, lo cual inutiliza al reactor y genera agua más contaminada, que se fue almacenando dentro de la central
- ✓ Hacía falta más agua, por lo que hubo que evacuar agua (un poco) radiactiva para hacer sitio para agua (muy) radiactiva



Explosión de hidrógeno en la unidad 3

4. Accidentes nucleares

- ✓ La liberación del agua radiactiva, más la consideración de los accidentes como uno solo, elevó el grado de alarma a **INES 7**, como en Chernóbil
- ✓ **Eso no implica que sean accidentes igual de graves**
- ✓ La contención conservan su integridad estructural, y fuera de la central se han detectado gases radiactivos, que bien son de las emisiones controladas o de pequeñas fisuras en la vasija del reactor
- ✓ Más seria es la situación de la contención del reactor 2, **ligeramente dañada**, y se han detectado pequeñas trazas de materiales no volátiles

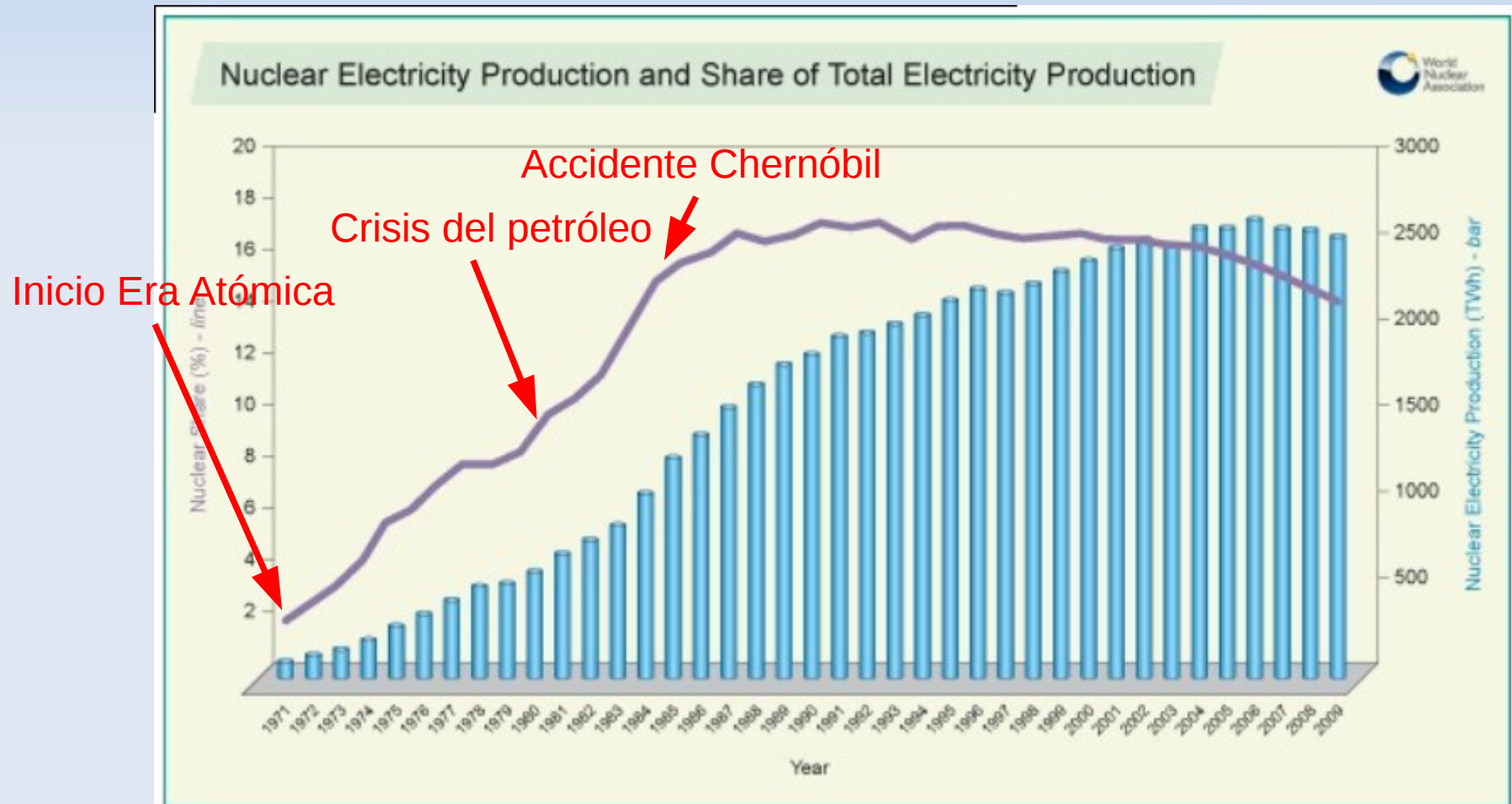


4. Accidentes nucleares

- ✓ Hay enormes **diferencias entre Fukushima I y Chernóbil**
 - **Las causas:** Infraestimación de los riesgos/graves negligencias
 - **La reacción al accidente:** reacción inmediata por gente cualificada, protección de los afectados/improvisación y dejadez
 - **La cobertura informativa:** información en tiempo real/ocultación por intereses políticos y propagandísticos
 - **El efecto ambiental:** liberación (en gran parte) controlada de gases/emisión descontrolada de productos no volátiles a la atmósfera durante días
 - **Bajas civiles:** **ningún fallecido por radiación**/30 muertos directos
- ✓ No obstante, con el tiempo se conocerán los detalles, se sabrán realmente cuáles son las consecuencias del accidente, y si se manejó bien

5. El futuro de la energía nuclear

- ✓ Tras un incremento inicial notable, la energía nuclear ha sufrido una serie de altibajos en las últimas décadas



5. El futuro de la energía nuclear

- ✓ Sin embargo, una serie de circunstancias están forzando a replantearse la energía nuclear:
 - el aumento del precio del petróleo
 - los problemas medioambientales derivados del uso de combustibles fósiles
 - el aumento de la demanda energética (China, La India, ...)
- ✓ Estos factores hacen que se planteen nuevos esfuerzos en materia nuclear: **renacer nuclear**
- ✓ A día de hoy se están construyendo 64 reactores nucleares en el mundo (25 en China)

5. El futuro de la energía nuclear

- ✓ Por otro lado, hay montones de grandes proyectos que se han visto cancelados en la última década por falta de seguridad o inviabilidad económica
- ✓ El problema de los residuos de alta actividad no está resuelto
- ✓ China está construyendo muchos reactores y muy rápido, lo cual preocupa a la comunidad internacional
- ✓ El accidente de Fukushima I va a afectar a la industria (lo cual no es malo: se mejorará la seguridad, aunque reduciendo la rentabilidad)
- ✓ Por tanto, **no está claro el futuro** de la energía nuclear tal y como la conocemos hoy

5. El futuro de la energía nuclear

- ✓ En cuanto a la tecnología, el futuro es una competición entre nuevos diseños de **reactores de fisión** y **reactores de fusión**
- ✓ Los reactores actuales de fisión (~ hasta los 90) se denominan de **segunda generación**
- ✓ Los de **tercera generación** (algunos ya están en funcionamiento) incluyen mejoras en la seguridad y ahorros en los costes. Son versiones mejoradas de las tecnologías convencionales
- ✓ Los de **cuarta generación** (no disponibles hasta ~ 2030) generan mucha más energía por kilogramo de combustible, reutilizan combustible usado y sus residuos tienen vidas medias de cientos de años, en lugar de miles (reactor de Torio)

5. El futuro de la energía nuclear

- ✓ Finalmente, la energía de fusión generan **grandes expectativas ecológicas y económicas**
- ✓ El combustible es hidrógeno, un elemento muy abundante (está en el agua)
- ✓ El residuo es helio, un gas noble inocuo y estable (aunque el propio reactor termina siendo radiactivo por los neutrones emitidos)
- ✓ Esta tecnología está en desarrollo en el proyecto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), que está en desarrollo y se extenderá hasta el 2038



Participantes en el proyecto ITER