



Universidad de Salamanca  
Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Industrial

# Accidentes nucleares

Norberto Redondo Melchor  
Doctor Ingeniero Industrial

1

## Programa

- 1.Central nuclear
- 2.Seguridad en las centrales nucleares
- 3.Three Mile Island
- 4.Chernobyl
- 5.Fukushima

# Central nuclear

## Fisión nuclear

Las cuatro interacciones fundamentales:

- Fuerza nuclear fuerte (fundamental y residual)
- Fuerza electromagnética
- Fuerza nuclear débil (tres tipos de interacciones)
- Fuerza gravitatoria

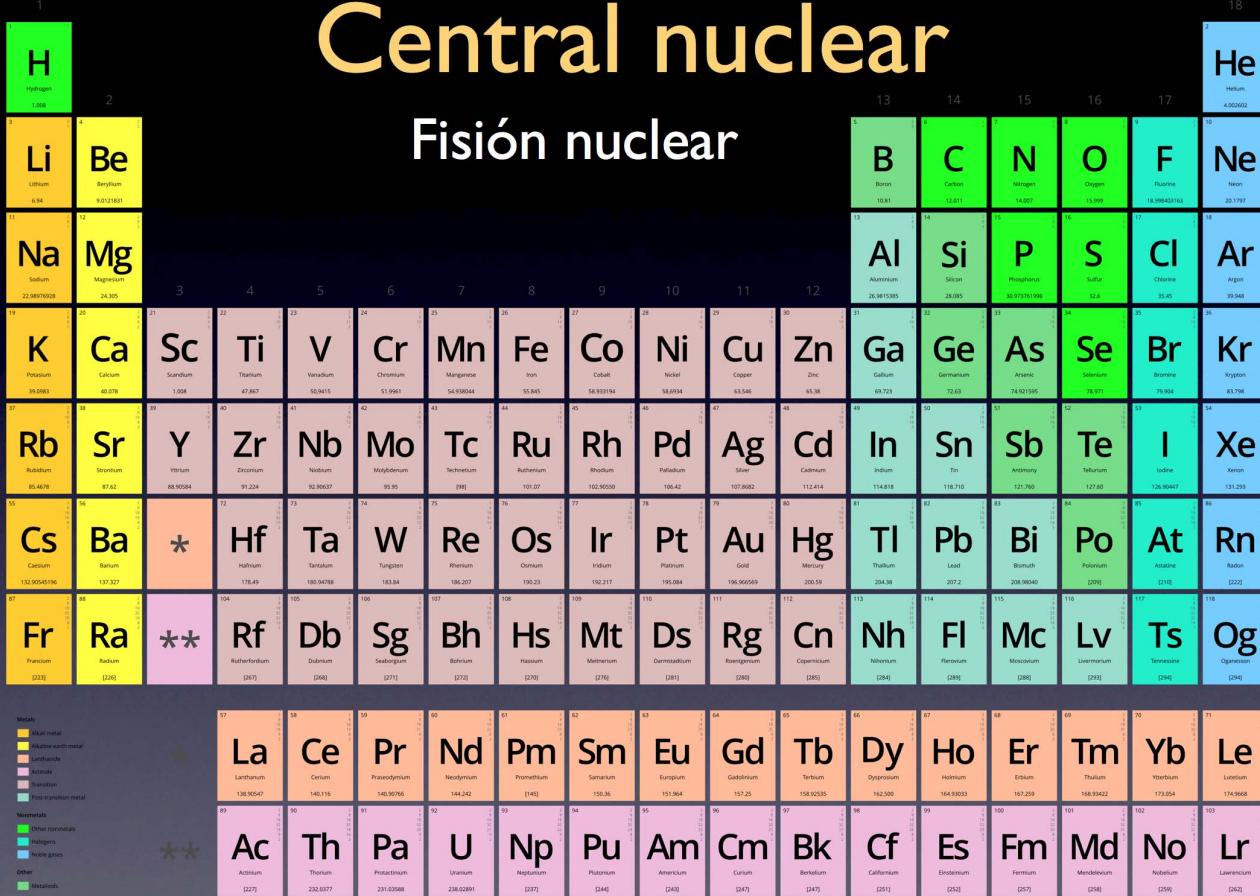
Wikipedia

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

3

# Central nuclear

## Fisión nuclear



A periodic table where certain elements are highlighted in yellow, indicating they are fissile or fissionable. These include Uranium-235, Plutonium-239, Neptunium-237, Americium-241, Curium-247, Bk-247, Cf-252, Es-253, Fm-254, Md-255, No-256, and Lr-256. The table also includes the atomic number, element name, symbol, and atomic mass for each element.

1	H	2	He
1.008	Hydrogen	4.002602	Helium
6.94	Lithium	10.81	12.011
19.007	Boron	14.007	15.999
22.98976196	Carbon	17.000	18.99401763
24.305	Nitrogen	19.000	20.1797
35.467	Oxygen	20.8815385	Neon
39.947	Fluorine	20.994	21.994
40.078	Neon	22.981540	Argon
41.982	Aluminum	23.981540	36.994
42.011	Silicon	24.981540	Krypton
43.016	Phosphorus	25.981540	39.994
44.018	Sulfur	26.981540	40.994
45.020	Gallium	27.981540	41.994
46.021	Germanium	28.981540	42.994
47.022	Arsenic	29.981540	43.994
48.023	Selenium	30.981540	44.994
49.024	Bromine	31.981540	45.994
50.94679	Krypton	32.981540	46.994
51.961	Rubidium	33.981540	47.994
52.981	Silver	34.981540	48.994
53.993	Cadmium	35.981540	49.994
54.994	Inium	36.981540	50.994
55.995	Tin	37.981540	51.994
56.996	Antimony	38.981540	52.994
57.997	Tellurium	39.981540	53.994
58.998	Iodine	40.981540	54.994
59.999	Xenon	41.981540	55.994
60.000	Rhenium	42.981540	56.994
61.001	Technetium	43.981540	57.994
62.002	Ruthenium	44.981540	58.994
63.003	Rhodium	45.981540	59.994
64.004	Palladium	46.981540	60.994
65.005	Ruthenium	47.981540	61.994
66.006	Rhenium	48.981540	62.994
67.007	Technetium	49.981540	63.994
68.008	Ruthenium	50.981540	64.994
69.009	Rhenium	51.981540	65.994
70.010	Ruthenium	52.981540	66.994
71.011	Rhenium	53.981540	67.994
72.012	Ruthenium	54.981540	68.994
73.013	Rhenium	55.981540	69.994
74.014	Ruthenium	56.981540	70.994
75.015	Rhenium	57.981540	71.994
76.016	Ruthenium	58.981540	72.994
77.017	Rhenium	59.981540	73.994
78.018	Ruthenium	60.981540	74.994
79.019	Rhenium	61.981540	75.994
80.020	Ruthenium	62.981540	76.994
81.021	Rhenium	63.981540	77.994
82.022	Ruthenium	64.981540	78.994
83.023	Rhenium	65.981540	79.994
84.024	Ruthenium	66.981540	80.994
85.025	Rhenium	67.981540	81.994
86.026	Ruthenium	68.981540	82.994
87.027	Rhenium	69.981540	83.994
88.028	Ruthenium	70.981540	84.994
89.029	Rhenium	71.981540	85.994
90.030	Ruthenium	72.981540	86.994
91.031	Rhenium	73.981540	87.994
92.032	Ruthenium	74.981540	88.994
93.033	Rhenium	75.981540	89.994
94.034	Ruthenium	76.981540	90.994
95.035	Rhenium	77.981540	91.994
96.036	Ruthenium	78.981540	92.994
97.037	Rhenium	79.981540	93.994
98.038	Ruthenium	80.981540	94.994
99.039	Rhenium	81.981540	95.994
100.040	Ruthenium	82.981540	96.994
101.041	Rhenium	83.981540	97.994
102.042	Ruthenium	84.981540	98.994
103.043	Rhenium	85.981540	99.994
104.044	Ruthenium	86.981540	100.994
105.045	Rhenium	87.981540	101.994
106.046	Ruthenium	88.981540	102.994
107.047	Rhenium	89.981540	103.994
108.048	Ruthenium	90.981540	104.994
109.049	Rhenium	91.981540	105.994
110.050	Ruthenium	92.981540	106.994
111.051	Rhenium	93.981540	107.994
112.052	Ruthenium	94.981540	108.994
113.053	Rhenium	95.981540	109.994
114.054	Ruthenium	96.981540	110.994
115.055	Rhenium	97.981540	111.994
116.056	Ruthenium	98.981540	112.994
117.057	Rhenium	99.981540	113.994
118.058	Ruthenium	100.981540	114.994
119.059	Rhenium	101.981540	115.994
120.060	Ruthenium	102.981540	116.994
121.061	Rhenium	103.981540	117.994
122.062	Ruthenium	104.981540	118.994
123.063	Rhenium	105.981540	119.994
124.064	Ruthenium	106.981540	120.994
125.065	Rhenium	107.981540	121.994
126.066	Ruthenium	108.981540	122.994
127.067	Rhenium	109.981540	123.994
128.068	Ruthenium	110.981540	124.994
129.069	Rhenium	111.981540	125.994
130.070	Ruthenium	112.981540	126.994
131.071	Rhenium	113.981540	127.994
132.072	Ruthenium	114.981540	128.994
133.073	Rhenium	115.981540	129.994
134.074	Ruthenium	116.981540	130.994
135.075	Rhenium	117.981540	131.994
136.076	Ruthenium	118.981540	132.994
137.077	Rhenium	119.981540	133.994
138.078	Ruthenium	120.981540	134.994
139.079	Rhenium	121.981540	135.994
140.080	Ruthenium	122.981540	136.994
141.081	Rhenium	123.981540	137.994
142.082	Ruthenium	124.981540	138.994
143.083	Rhenium	125.981540	139.994
144.084	Ruthenium	126.981540	140.994
145.085	Rhenium	127.981540	141.994
146.086	Ruthenium	128.981540	142.994
147.087	Rhenium	129.981540	143.994
148.088	Ruthenium	130.981540	144.994
149.089	Rhenium	131.981540	145.994
150.090	Ruthenium	132.981540	146.994
151.091	Rhenium	133.981540	147.994
152.092	Ruthenium	134.981540	148.994
153.093	Rhenium	135.981540	149.994
154.094	Ruthenium	136.981540	150.994
155.095	Rhenium	137.981540	151.994
156.096	Ruthenium	138.981540	152.994
157.097	Rhenium	139.981540	153.994
158.098	Ruthenium	140.981540	154.994
159.099	Rhenium	141.981540	155.994
160.100	Ruthenium	142.981540	156.994
161.101	Rhenium	143.981540	157.994
162.102	Ruthenium	144.981540	158.994
163.103	Rhenium	145.981540	159.994
164.104	Ruthenium	146.981540	160.994
165.105	Rhenium	147.981540	161.994
166.106	Ruthenium	148.981540	162.994
167.107	Rhenium	149.981540	163.994
168.108	Ruthenium	150.981540	164.994
169.109	Rhenium	151.981540	165.994
170.110	Ruthenium	152.981540	166.994
171.111	Rhenium	153.981540	167.994
172.112	Ruthenium	154.981540	168.994
173.113	Rhenium	155.981540	169.994
174.114	Ruthenium	156.981540	170.994
175.115	Rhenium	157.981540	171.994
176.116	Ruthenium	158.981540	172.994
177.117	Rhenium	159.981540	173.994
178.118	Ruthenium	160.981540	174.994
179.119	Rhenium	161.981540	175.994
180.120	Ruthenium	162.981540	176.994
181.121	Rhenium	163.981540	177.994
182.122	Ruthenium	164.981540	178.994
183.123	Rhenium	165.981540	179.994
184.124	Ruthenium	166.981540	180.994
185.125	Rhenium	167.981540	181.994
186.126	Ruthenium	168.981540	182.994
187.127	Rhenium	169.981540	183.994
188.128	Ruthenium	170.981540	184.994
189.129	Rhenium	171.981540	185.994
190.130	Ruthenium	172.981540	186.994
191.131	Rhenium	173.981540	187.994
192.132	Ruthenium	174.981540	188.994
193.133	Rhenium	175.981540	189.994
194.134	Ruthenium	176.981540	190.994
195.135	Rhenium	177.981540	191.994
196.136	Ruthenium	178.981540	192.994
197.137	Rhenium	179.981540	193.994
198.138	Ruthenium	180.981540	194.994
199.139	Rhenium	181.981540	195.994
200.140	Ruthenium	182.981540	196.994
201.141	Rhenium	183.981540	197.994
202.142	Ruthenium	184.981540	198.994
203.143	Rhenium	185.981540	199.994
204.144	Ruthenium	186.981540	200.994
205.145	Rhenium	187.981540	201.994
206.146	Ruthenium	188.981540	202.994
207.147	Rhenium	189.981540	203.994
208.148	Ruthenium	190.981540	204.994
209.149	Rhenium	191.981540	205.994
210.150	Ruthenium	192.981540	206.994
211.151	Rhenium	193.981540	207.994
212.152	Ruthenium	194.981540	208.994
213.153	Rhenium	195.981540	209.994
214.154	Ruthenium	196.981540	210.994
215.155	Rhenium	197.981540	211.994
216.156	Ruthenium	198.981540	212.994
217.157	Rhenium	199.981540	213.994
218.158	Ruthenium	200.981540	214.994
219.159	Rhenium	201.981540	215.994
220.160	Ruthenium	202.981540	216.994
221.161	Rhenium	203.981540	217.994
222.162	Ruthenium	204.981540	218.994
223.163	Rhenium	205.981540	219.994
224.164	Ruthenium	206.981540	220.994
225.165	Rhenium	207.981540	221.994
226.166	Ruthenium	208.981540	222.994
227.167	Rhenium	209.981540	223.994
228.168	Ruthenium	210.981540	224.994
229.169	Rhenium	211.981540	225.994
230.170	Ruthenium	212.981540	226.994
231.171	Rhenium	213.981540	227.994
232.172	Ruthenium	214.981540	228.994
233.173	Rhenium	215.981540	229.994
234.174	Ruthenium	216.981540	230.994
235.175	Rhenium	217.981540	231.994
236.176	Ruthenium	218.981540	232.994
237.177	Rhenium	219.981540	233.994
238.178	Ruthenium	220.981540	234.994
239.179	Rhenium	221.981540	235.994
240.180	Ruthenium	222.981540	236.994
241.181	Rhenium	223.981540	237.994
242.182	Ruthenium	224.981540	238.994</td

# Central nuclear

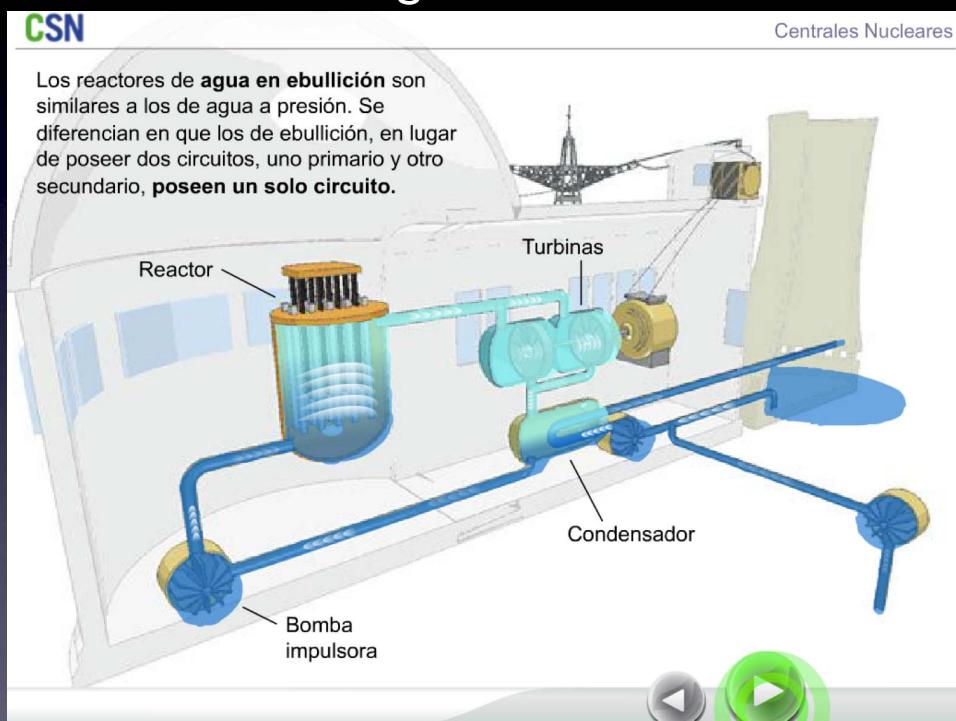
## Primeros reactores

### Cronología:

- 1942 proyecto Manhattan (Robert Oppenheimer)
- 1945 bomba Trinity (desierto Alamogordo)
- 1945 bomba uranio (Hiroshima) y plutonio (Nagasaki)
- 1955 submarino nuclear Nautilus SSN-571
- 1960 BWR (General Electric) / PWR (Westinghouse)
- ....

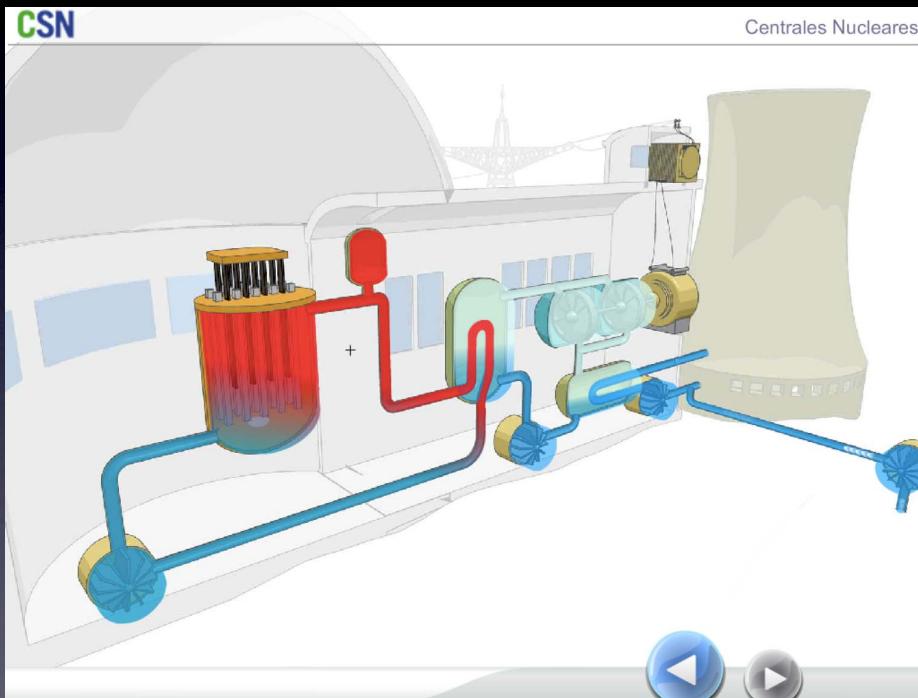
# Central nuclear

## BWR - Boiling Water Reactor



# Central nuclear

PWR - Pressurized Water Reactor



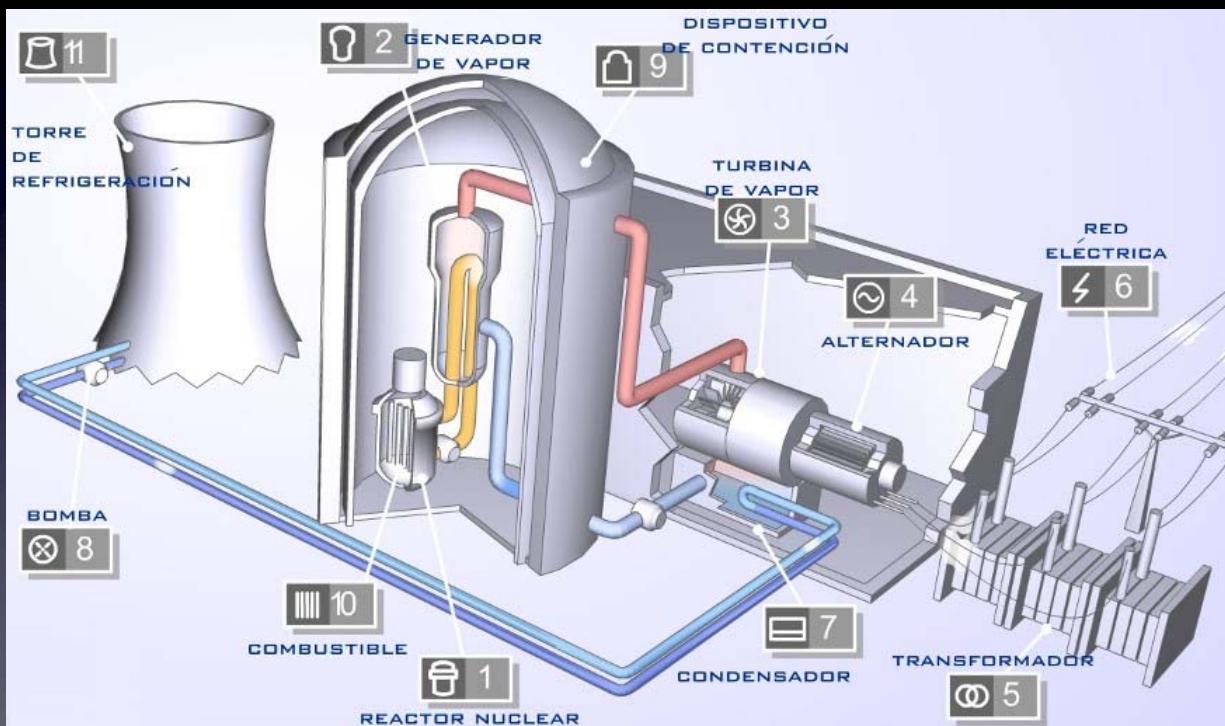
Wikipedia

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

7

# Central nuclear

PWR - Pressurized Water Reactor



Wikipedia

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

8

# Centrales nucleares en España

**CSN** Centrales Nucleares

En España existen **8 centrales nucleares activas**, 6 de las cuales son de tipo **reactor de agua a presión** ( PWR: Pressure Water Reactor) y 2 de agua en ebullición (BWR: Boiling Water Reactor).

Map showing the locations of 8 active nuclear power plants in Spain. The plants are located in the following regions:

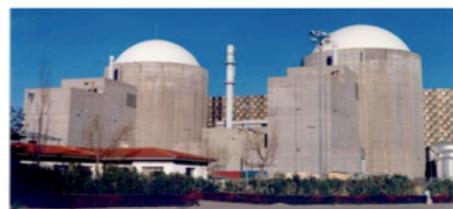
- Asturias
- Castilla y León
- Aragón
- Extremadura
- Castilla-La Mancha

Consejo de Seguridad Nuclear

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

9

## Central nuclear



CENTRAL NUCLEAR DE ALMARAZ

Propiedad	Endesa – Iberdrola –Gas Natural	
Titular	Centrales nucleares Almaraz/Trillo AIE	
Tipo	PWR	
Potencia térmica	2. 947MWt (U-I)	2.947 MWt (U-II)
Potencia eléctrica	1.049 MWe (U-I)	1.044 MWe (U-II)
Refrigeración	Abierta embalse de Arrocampo	
Autorización construcción	02/07/1973(U-I)	02/07/1973 (U-II)
Autorización puesta en marcha	10/03/1980 (U-I)	15/06/1983 (U-II)
Autorización explotación en vigor	07/06/2010	
Autorización explotación válida hasta	08/06/2020	

# Programa

- 1.Central nuclear
- 2.Seguridad en las centrales nucleares
- 3.Three Mile Island
- 4.Chernobyl
- 5.Fukushima

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

11

## Normas de seguridad nuclear

- Ley 25-1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear
- Ley 15-1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear
- Real Decreto 1836-1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas
- Instrucción IS-26, de 16 de junio de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre requisitos básicos de seguridad nuclear aplicables a las instalaciones nucleares
- Directiva 2014-87-EURATOM, del Consejo, de 8 de julio de 2014, por la que se modifica la Directiva 2009-71-EURATOM del Consejo, de 25 de junio de 2009, por la que se establece un marco comunitario para la seguridad nuclear de las instalaciones nucleares
- Directiva 2009-71-EURATOM del Consejo, de 25 de junio de 2009, por la que se establece un marco comunitario para la seguridad nuclear de las instalaciones nucleares
- (OIEA) Principios fundamentales seguridad SF-1

# Normas de seguridad nuclear

- Instrucción IS-26

Tercero. *Objetivo y requisitos generales.*

Objetivo General de Seguridad de las Instalaciones Nucleares:

3.1 El titular de la instalación nuclear debe tener como objetivo general de seguridad proteger a las personas y al medio ambiente de los efectos perjudiciales de las radiaciones ionizantes. En cumplimiento de dicho objetivo el titular de la instalación deberá tomar medidas para:

- a) Limitar, minimizar y controlar la exposición a la radiación de las personas y la liberación de materiales radiactivos al medio ambiente,
- b) Limitar la probabilidad de sucesos que puedan producir la pérdida de control sobre cualquier fuente de radiación,
- c) Mitigar las consecuencias de dichos sucesos en el caso de que ocurran,
- d) Minimizar la generación de residuos radiactivos.

BOE

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

13

# Normas de seguridad nuclear

- Instrucción IS-26

Diseño seguro:

- Barreras pasivas y activas
- Funciones de seguridad bien definidas para:
  - Control de reactividad
  - Extracción del calor
  - Confinamiento y blindaje
- Identificación de fallos verosímiles
- Clasificación de seguridad para determinar:
  - Estándares de calidad
  - Pruebas
- Compatibilidad entre sistemas (art. 5.11)

# Normas de seguridad nuclear

- Instrucción IS-26

Requisitos de diseño seguro:

- Procesos intrínsecamente seguros
- Elementos de seguridad pasiva
- Elementos de seguridad activa
- Controles administrativos

Condiciones externas de diseño:

- Ambientales
- Sísmicas
- Incendios
- Inundaciones
- Pérdida de red eléctrica
- Atentados

Criterios de diseño seguro:

- Seguridad inherente
- Seguridad pasiva
- Fallo en posición segura
- Fallo único
- Doble contingencia
- Independencia
- Redundancia
- Diversidad

# Normas de seguridad nuclear

- Instrucción IS-26

5.14 Las estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad se diseñarán de modo que se facilite su mantenimiento, inspección y prueba para garantizar su capacidad funcional durante la vida de la instalación.

5.15 Las estructuras, sistemas y componentes de seguridad serán capaces de realizar sus funciones de seguridad incluso ante la pérdida de sistemas soporte clasificados como no de seguridad, o de lo contrario, se diseñarán para que pasen a un estado seguro en caso de fallo.

5.16 El diseño de las estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad deberá estar basado en tecnologías probadas y validadas en condiciones de funcionamiento similares a las de operación.

5.17 Las estructuras, sistemas y componentes de seguridad se diseñarán con márgenes de seguridad, incluyendo incertidumbres con el fin de proporcionar garantías razonables de que no se producirán consecuencias importantes aún cuando se sobrepasen los límites operacionales.

5.18 Los sistemas y componentes de seguridad deben diseñarse de modo que actúen automáticamente en caso de sucesos operacionales previstos y accidentes de evolución rápida, y mantengan la instalación en condición segura sin que sea necesaria la intervención manual del personal de operación durante un tiempo suficiente para que se puedan considerar e implantar las acciones posteriores necesarias.

# Normas de seguridad nuclear

- Instrucción IS-26

## Instrumentación y control:

5.25 Las instalaciones nucleares con sistemas o componentes importantes para la seguridad deberán disponer de equipos de monitorización y control para las diferentes funciones de seguridad, así como de una sala de control para supervisar el adecuado funcionamiento de la instalación.

5.26 Deberán establecerse medios para la vigilancia de todos los procesos y equipos esenciales durante un accidente y después del mismo.

5.27 En el caso de que el riesgo de la instalación lo requiera, se establecerán medios para la parada remota desde fuera de la sala de control.

5.28 Para los sistemas de instrumentación y control importantes para la seguridad basados en tecnología digital, se establecerán normas y precauciones apropiadas para el desarrollo, prueba del equipo y mantenimiento, que se aplicarán durante toda la vida del sistema, en especial en la etapa de desarrollo de la aplicación informática.

# Programa

- 1.Central nuclear
- 2.Seguridad en las centrales nucleares
- 3.Three Mile Island
- 4.Chernobyl
- 5.Fukushima

# Three Mile Island

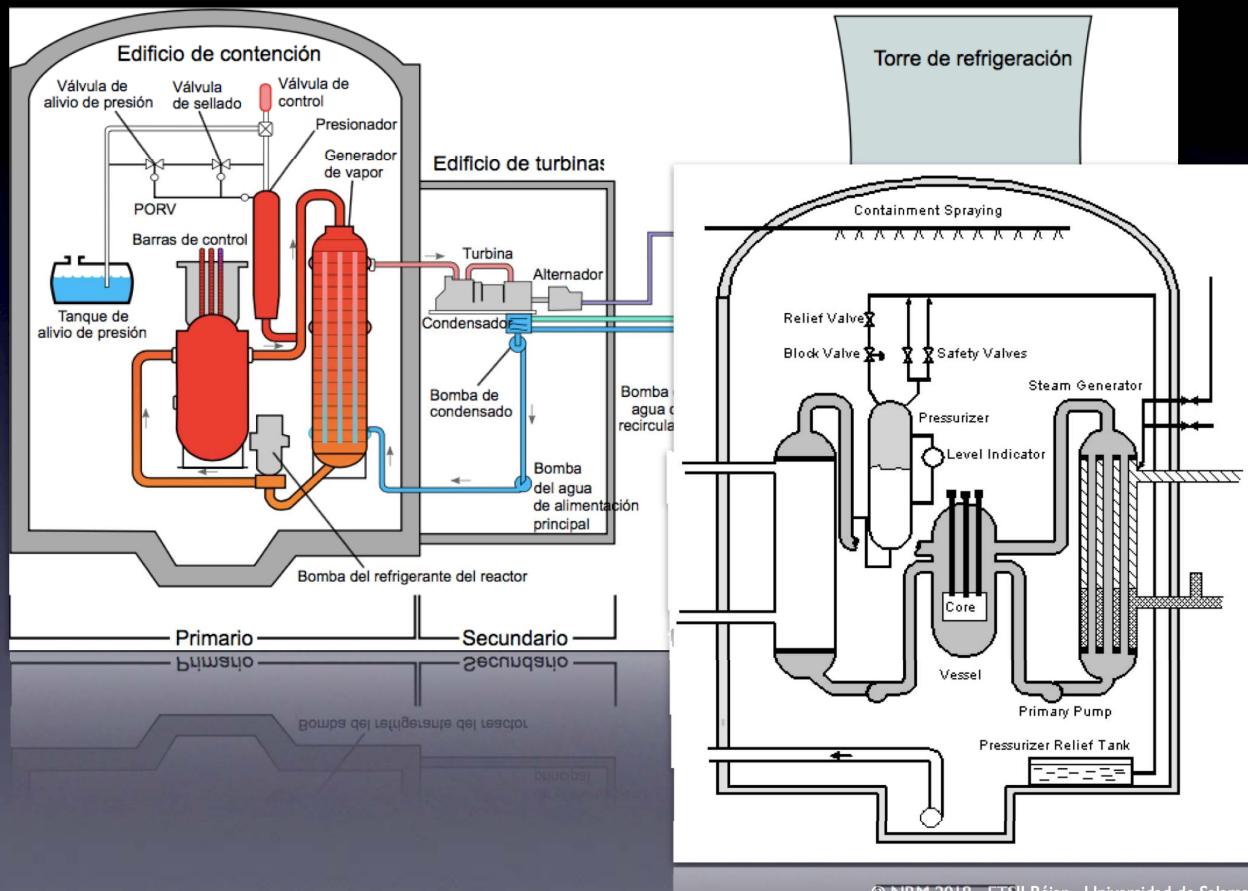


Estados Unidos, 1979

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

19

# Three Mile Island



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

20

# Three Mile Island

Secuencia comprobada:

- 4:00 h:
  - Pérdida de flujo secundario a través del generador de vapor
  - Apagado de urgencia del reactor
  - Arranca el sistema de enfriamiento urgente del primario
  - Abre la válvula de alivio circuito primario 12 s
  - **Falla al cerrar (no se advierte)**
  - Se fuga agua primaria (60 m<sup>3</sup>/h)
- 4:01 h:
  - Arranca sistema secundario flujo a través del generador de vapor
  - ¡Llaves cerradas! No circula agua
- 4:02 h:
  - Inyección automática de agua fría en el circuito primario
  - Continúa la fuga de fluido primario
- 4:06 h:
  - ¡Exceso de nivel de agua primaria en el presurizador!
- 4:08 h:
  - Abren llaves cerradas
  - Continúa la fuga de fluido primario
- 4:11 h:
  - Exceso de nivel en presurizador
  - ¡Corte manual de inyección de agua fría al primario!
- 4:17 h:
  - Rotura del sistema de enfriamiento urgente del primario
  - El fluido primario empieza a hervir
  - Las bombas recirculadoras primarias vibran muchísimo
- 4:25 h:
  - Circuito secundario estable
  - Continúa la fuga de fluido primario
  - Vibración alarmante de las bombas de primario
- 5:13 h:
  - Apagado manual bomba primario 01 para conservarla
  - Continúa la fuga de fluido primario
- 5:40 h:
  - Apagado manual bomba primario 02
  - Ya no queda agua primaria para cubrir el núcleo
  - El zirconio alcanza 1300°C y libera H<sub>2</sub>
- 6:00 h:
  - Se funde masivamente el núcleo
  - Se contamina el sistema secundario de enfriamiento urgente
- 6:14 h:
  - Alarma de contaminación en el contenedor primario
  - Cierre manual de la válvula de alivio primario
  - Incremento peligroso de la presión primaria
- 6:40 h:
  - Vapor primario desaparece por presión
  - Intento de refrigerar con bomba primario 01
  - Se vuelve a generar vapor y vibraciones
- 7:12 h:
  - Presión insostenible en circuito primario.
  - Apertura manual válvula de alivio primario
  - Gran contaminación contenedor primario y secundario
  - **Sistema secundario enfriamiento urgente desborda hacia el exterior**
  - Alarmas de radiactividad en el exterior
- 7:20 h:
  - Se declara alarma general
  - Paro manual enfriamiento secundario
  - Arranca bomba 01 primario
  - **Explosión contenida de hidrógeno**
  - Liberación de gases nobles radiactivos
- 8:00 h: el núcleo empieza enfriarse por fin!

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

21

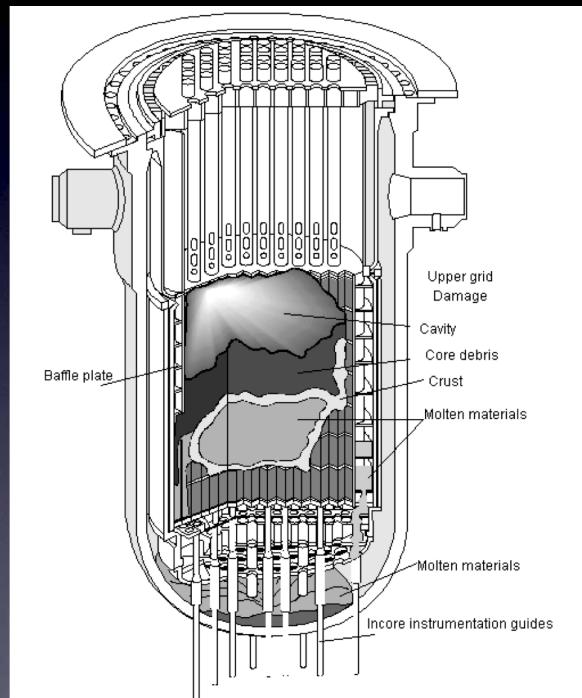
# Three Mile Island

Riesgos ambientales:

- Fuga de gases nobles (370-470 PBq)
- No hubo fuga de partículas (filtros)
- Explosión de hidrógeno contenida

Daños producidos:  
(comprobados al remover la tapa del reactor en 1984)

- Fundidas 62 t del núcleo (45%)
- 19 t aparecieron en el fondo
- Menos daños que los esperados



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

22

# Chernobyl

El nuevo sarcófago



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

23

# Chernobyl

Accidente del 26 de abril de 1986



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

24